www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

PHILIPS TECHNISCH TIJDSCHRIFT

JAARGANG 26, 1964/65, no. 11/12

Een hermetische stang- en zuigerafdichting voor grote drukverschillen

J. A. Rietdijk, H. C. J. van Beukering, H. H. M. van der Aa en R. J. Meijer

621-762.649

Bij heetgasmotoren en koudgaskoelmachines, die berusten op het Stirling-proces, vormen de bewegende afdichtingen van de gasruimten een der moeilijkste problemen. Dit probleem heeft men nu, naar het zich laat aanzien, tot een afdoende oplossing kunnen brengen, dank zij het verrassende feit dat een kousvormig rubbermembraan meer dan twee miljard maal kan worden op- en afgerold zonder te breken — mits men het op een geschikte wijze doet. Ook voor andere machines opent de hier beschreven uitvinding belangrijke perspectieven.

Reeds vanaf het begin van de ontwikkeling van het Philips-Stirling-proces is aan het onderzoek van bewegende afdichtingen veel aandacht besteed. De Stirling-machine, waarvan in *fig. 1* twee mogelijke uitvoeringsvormen zijn weergegeven, bestaat uit een drijfwerk en een cilinder-zuigersysteem, waarin een werkmedium een gesloten kringproces uitvoert. Als werkmedium komen tegenwoordig vrijwel uitsluitend waterstof en helium onder hoge druk in aanmerking. Heetgasmotoren werken met drukken tot 140 atm, koudgaskoelmachines met drukken tot 60 atm. Voor de werking van deze machines wordt verwezen naar vroegere artikelen in dit tijdschrift [1] [2], de werking van de koudgaskoelmachine wordt bovendien geresumeerd in een ander artikel in dit nummer [3].

In de uitvoeringsvorm van fig. 1*a* komen twee bewegende afdichtingen voor, die de ruimte waarin zich het werkmedium bevindt moeten scheiden van de ruimte waarin het drijfwerk is geplaatst. Aan deze afdichtingen worden zeer hoge eisen gesteld: enerzijds wil men het kostbare helium, c.q. de ontbrandbare waterstof, niet laten ontsnappen, te meer omdat dit met rendementsverliezen van de machine gepaard gaat, anderzijds mogen de afdichtingen geen smeerolie of andere verontreinigingen naar de werkruimte doorlaten, aangezien dit tot een ernstige verstoring van het proces kan leiden (o.a. door vervuiling van de regenerator). Niettemin zal, ten einde slijtage te voorkomen, een zekere smering op de loopvlakken (rechtgeleidingen) van de zuiger of stang nodig zijn.

Dr. ir. J. A. Rietdijk, ir. H. C. J. van Beukering, H. H. M. van der Aa en dr. ir. R. J. Meijer zijn medewerkers van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

In de uitvoeringsvorm van fig. 1*b* komen, behalve twee afdichtingen met een functie als hierboven beschreven (de stangafdichtingen), twee afdichtingen voor die men „inwendige" afdichtingen zou kunnen noemen. Zij vormen geen afscheiding van de drijfwerkruimte,

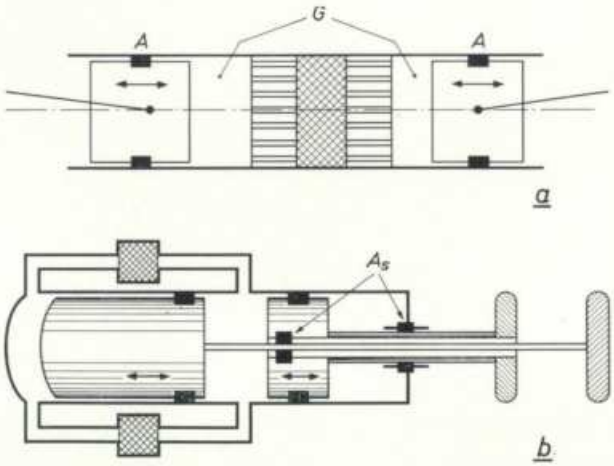


Fig. 1. *a*) Stirling-machine volgens het tweezuigerprincipe. Hierbij zijn twee afdichtingen *A* aanwezig, beide tussen de cyclusruimte *G* en het aandrijfmechanisme.
b) Stirling-machine volgens het verdringerprincipe. Hierbij zijn, behalve twee afdichtingen die de gasruimte scheiden van „buiten" (de stangafdichtingen A_s), ook twee afdichtingen nodig welke ruimten met gelijke gemiddelde druk van elkaar scheiden.

[1] J. W. L. Köhler en C. O. Jonkers, Grondslagen van de koudgaskoelmachine; Constructie van een koudgaskoelmachine, Philips techn. T. **16**, 33-43 en 61-71, 1954.
[2] R. J. Meijer, De Philips heetgasmotor met ruitdrijfwerk, Philips techn. T. **20**, 325-342, 1958.
[3] A. A. Dros, Een koudgaskoelmachine met hydraulische zuigeraandrijving voor industriële toepassingen, Philips techn. T. **26**, 355-367, 1964/65 (no. 11/12).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

doch zij moeten verschillende ruimten waarin zich het werkmedium bevindt van elkaar scheiden. Ook hier heeft een lek langs de afdichtingen een nadelige invloed op de prestaties van de Stirling-machine, en de eis om de werkruimten schoon te houden, maakt de smering van de loopvlakken tot een bijzonder moeilijk probleem.

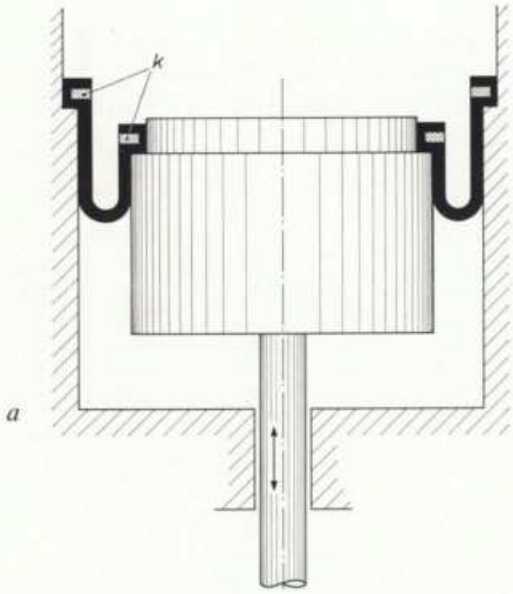
Het zou te ver voeren hier uitvoerig in te gaan op alle in de techniek bekende afdichtingen welke zich in principe voor de beschreven taken lenen. Als hoofdvormen van afdichtingen kunnen we noemen: zuigerveren, O-ringen en manchetten, spleetafdichtingen (eventueel met labyrint) en pakkingbussen (alleen voor stangen). Geen van deze afdichtingen voldoet ten volle aan de bovengenoemde eisen: ze zijn in feite slechts te beschouwen als „lekbeperkers". Het compromiskarakter van deze afdichtingen deed zich in de loop van de ontwikkeling van heetgasmotoren en koudgaskoelmachines steeds schrijnender gevoelen, o.a. ook omdat de eisen aan de levensduur steeds hoger worden gesteld.

Sinds enige jaren (vanaf 1960) is in ons laboratorium een afdichting tot ontwikkeling gekomen welke behoort tot de categorie van de zg. hermetische afdichtingen (Engels: positive seals) en welke naar het zich laat aanzien ook toepassing zal kunnen vinden buiten het Stirling-proces. In dit artikel zullen wij deze afdichting uitvoerig bespreken en aangeven op welke wijze zij wordt toegepast in Stirling-machines. Bovendien zal de toepassing van deze afdichting voor olievrije compressoren worden besproken. Bij deze compressoren, die o.a. een grote rol spelen in vele koelprocessen en die ook worden gebruikt voor vervolgsystemen van de koudgaskoelmachine [4], is het essentieel dat het te verwerken medium absoluut niet wordt verontreinigd.

Rolmembranen

In de nieuwe afdichting wordt gebruik gemaakt van een reeds lang bekend principe, nl. dat van het rolmembraan. In *fig. 2a* is een afdichting met zulk een membraan voorgesteld, fig. 2*b* geeft een foto van het membraan zelf. Het membraan, dat van een rubberachtig materiaal moet zijn vervaardigd, rolt beurtelings af op de zuiger en de cilinder [5]. Deze beweging vertoont enige overeenkomst met die van een kous of sok, en in ons laboratorium heeft zich dan ook voor het rolmembraan in de bedoelde toepassing de naam „sok" ingeburgerd. De *geleiding* van de zuiger geschiedt op geheel analoge wijze als bij een conventionele afdichting.

Tot dusver konden rolmembranen slechts worden toegepast in betrekkelijk langzaam bewegende afdichtingen voor *kleine* drukverschillen, zoals in hydraulische en pneumatische stuur- en regelorganen, luchtveren en derg.. Een zeker minimum-drukverschil over het rolmembraan is nodig om een plooiloze afrolling te waarborgen. Om de bovengrens van het toegelaten



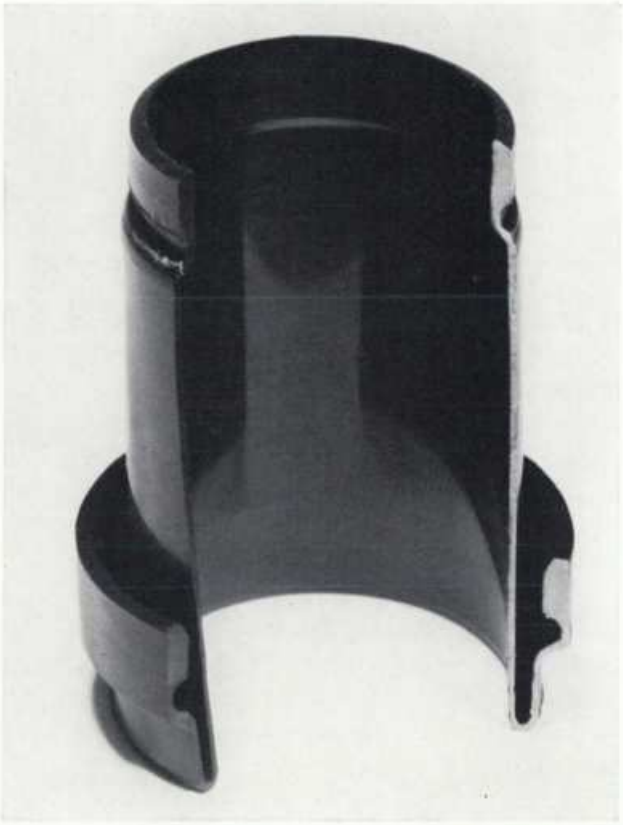


Fig. 2. *a*) Rolmembraan, bevestigd aan een zuiger en bijpassende cilinder. De bevestiging geschiedt met klemringen. Het rolmembraan, dat van een rubberachtig materiaal is vervaardigd, wordt door een klein drukverschil tegen de zuiger en de cilinder gedrukt, waardoor het bij de beweging van de zuiger plooiloos kan op- en afrollen. *b*) Opengesneden rolmembraan.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

drukverschil, die bij ca. 5 atm lag, te verhogen, heeft men de membranen veelal voorzien van een wapening, vergelijkbaar met het canvas van een autoband en bestaande uit een of ander weefsel dat slechts rek in omtrekrichting toestaat. De levensduur, uitgedrukt in het aantal gemaakte slagen tot breuk optreedt, was echter gering, vooral bij de gewapende rolmembranen.

In het volgende zullen wij laten zien hoe met betrekkelijk eenvoudige kunstgrepen een rolmembraan kan worden gebruikt om ook afdichtingen voor *zeer grote* drukverschillen te realiseren. Gebleken is dat daarbij door het gunstig kiezen van diverse omstandigheden een verrassend lange levensduur kan worden bereikt.

Het rolmembraan met vloeistofkussen

De oplossing van het probleem, hoe een rolmembraan te gebruiken in afdichtingen voor hoge drukken, werd gevonden in het ondersteunen van het membraan door :en vloeistofkussen; zie *fig. 3*. Hierbij wordt de be-)erktheid van het rolmembraan ten aanzien van het oelaatbare drukverschil geaccepteerd: over het mem-)raan zelf wordt slechts een gering, geschikt gekozen, drukverschil (ca. 5 atm) gehandhaafd. Het rolmembraan heeft op deze wijze alleen de taak een hermetische scheiding te vormen tussen de ondersteuningsvloeistof en het medium [6] boven de zuiger. Het eigenlijke drukverschil (b.v. een tussen 50 en 100 atm variërende druk) staat over een tweede afdichting, van conventioneel type, die een scheiding vormt tussen de onder het rolmembraan gelegen vloeistofruimte en de drijfwerkruimte.

Om het membraan te vrijwaren voor snelle slijtage en vermoeiing door wisselende rek, is het essentieel dat het voortdurend op de vloeistof rust en bij het op- en afrollen *niet van lengte verandert*. De wapening heeft bij toepassing van deze gedachte geen functie meer en blijkt zelfs nadelig te zijn voor het bereiken van een behoorlijke levensduur.

De eis van constante lengte is equivalent met de eis dat het *drukverschil* over het rolmembraan *constant* moet zijn. In fig. 3 is bij een bepaald drukverloop van het gas het gewenste drukverloop van de ondersteuningsvloeistof aangegeven, en wel voor het geval van het zg. holle rolmembraan (in de wandeling aangeduid met „holle sok"). Daarbij is de vloeistofdruk lager dan de gasdruk. Men kan het drukverschil over het rolmembraan ook tegengesteld kiezen, zodat de vloeistofdruk hoger is dan de gasdruk. We spreken dan van een bol rolmembraan („bolle sok"), zie *fig. 4*. Het oppervlak waarop het op- en afrollen plaatsvindt, wordt in dat geval echter niet gesmeerd, wat minder gunstig blijkt te zijn.

In het algemeen zal men als ondersteuningsvloeistof de smeerolie van de machine kiezen, vooral in verband

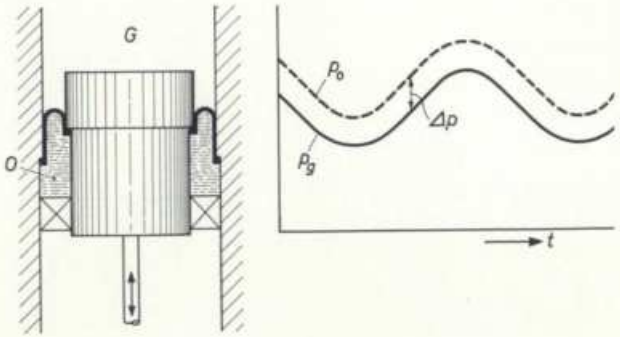


Fig. 3. Rolmembraan met vloeistofkussen. Afgezien van een klein drukverschil Δp over het rolmembraan, wordt de druk van het medium G opgenomen door de vloeistof O. De druk p_0 van de vloeistof moet steeds een constant bedrag Δp lager zijn dan de druk p_g van het medium. Dit is de zg. „holle sok". Rechts is het verloop van de genoemde drukken als functie van de tijd t getekend.

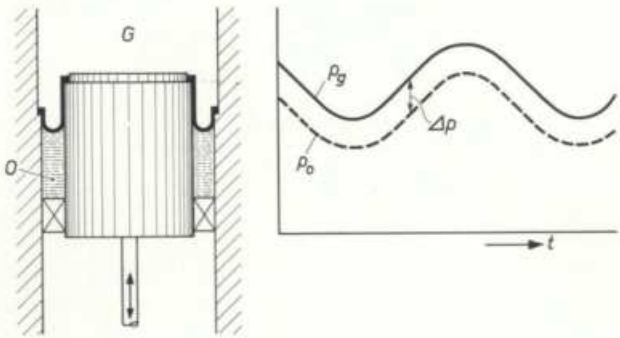


Fig. 4. Rolmembraan uitgevoerd als „bolle sok". De druk van de ondersteuningsvloeistof moet in dit geval steeds een constant bedrag *hoger* zijn dan de druk van het af te dichten medium. Rechts weer het verloop van de drukken met de tijd.

met de smering van het zuigerloopvlak. In hetgeen volgt zal daarom steeds worden gesproken over een olieondersteuning. In speciale gevallen kunnen echter ook andere vloeistoffen in aanmerking komen.

Aan de eis van constant drukverschil kan worden voldaan volgens twee methodes, te weten: het rolmembraan met „trapjesconstructie" en de „zwevende zuiger". Deze twee vormen zullen we nu nader bespreken.

Het constant houden van het drukverschil

Trapjesconstructie

Men kan aan de olieruimte onder het rolmembraan een zodanige vorm geven dat gedurende de beweging

[4] G. Prast, Een koudgaskoelmachine voor temperaturen tot 20 °K en lager, Philips techn. T. **26**, 1-11, 1964/65 (no. 1), speciaal blz. 11.

[5] De afdichting is zowel geschikt voor een stangdoorvoer als voor een zuiger in een cilinder. In het volgende zullen we slechts spreken over zuiger en cilinder. Er mag dan evenwel ook gedacht worden aan een stang in combinatie met een cilinderbodem.

[6] In het algemeen zal dit medium een gas zijn. De afdichting is echter onveranderd ook geschikt voor b.v. een vloeistofpomp. In het volgende zullen wij gemakshalve alleen van een gas spreken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

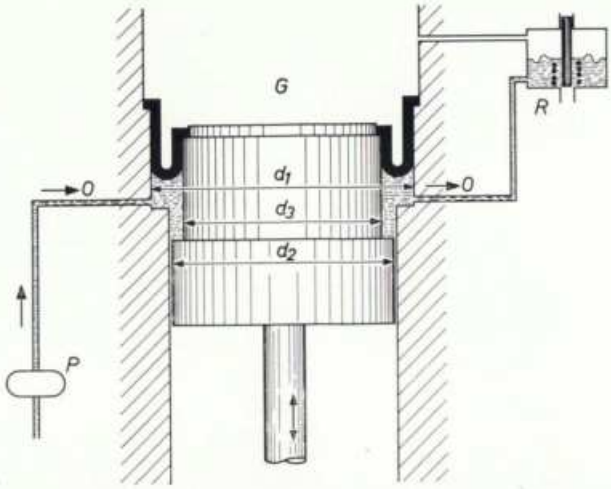


Fig. 5. Rolmembraan met ondersteuning volgens het trapjesprincipe. Het rolmembraan zal geen lengteveranderingen ondergaan wanneer de zuiger beweegt, mits de oliehoeveelheid niet verandert. De olie *O* wordt toegevoerd door middel van een oliepomp *P* en afgevoerd via een regelklep *R*. Deze regelklep bestaat uit een veerbelast membraan, waarover het verschil van de gemiddelde druk van gas en olie staat. Het membraan bedient twee klepjes; een gasklep, welke alleen opent als het drukverschil te groot wordt (veiligheidsklepje), en een olieafvoerklepje, dat bij normaal bedrijf steeds „snijdend" staat. Deze methode voor het constanthouden van de membraanlengte is geschikt zowel voor holle als voor bolle rolmembranen.

het volume van deze ruimte constant blijft bij constant blijvende lengte van het rolmembraan. Dit wordt gerealiseerd door de zuiger en de cilinder *getrapt* uit te voeren volgens *fig. 5*, en wel zo dat de oppervlakte van het trapje in de zuiger gelijk is aan de oppervlakte van het trapje in de cilinder. Hieraan wordt voldaan als tussen de diameters van zuiger en cilinder de volgende relatie bestaat:

$$d_2^2 = \frac{1}{2}(d_1^2 + d_3^2). \quad \ldots\ldots (1)$$

Dat het volume van de olieruimte dan constant is, ziet men door de zuiger over een zekere afstand te verplaatsen. Bij gelijkblijvende lengte wordt de bocht van het rolmembraan over de helft van deze afstand verplaatst, terwijl het trapje in de zuiger — de helft van de oppervlakte van de spleet — de hele afstand aflegt. Het totale volume verandert dus niet. Door deze ruimte met een zodanige hoeveelheid olie te vullen dat het rolmembraan de vereiste voorspanning heeft, hetzij als „holle sok", hetzij als „bolle sok", krijgt men het gewenste resultaat.

In de praktijk zullen geringe afwijkingen van de hierboven geschetste ideale werking optreden. Als oorzaken hiervan kunnen we noemen o.a. de samendrukbaarheid van de olie, het niet volledig star zijn van de begrenzende wanden en de toleranties in de verschillende diameters. Het membraan zal dus toch in lengte fluctueren. Men kan de genoemde afwijkingen binnen zodanige perken houden dat de lengteveranderingen klein genoeg blijven om bij ongewapende rolmembranen geen moeilijkheden te veroorzaken. Bij gewapende rolmembranen zouden zij echter tot zeer hoge spanningen aanleiding geven. Het vloeistofkussen met trapjesconstructie kan derhalve alleen worden toegepast voor *ongewapende* rolmembranen.

De olieondersteuning vereist nog enkele maatregelen. Via de olieafdichting, waarvoor ons slechts de eerder genoemde lekbeperkende methodes ter beschikking staan, zal olie uit de olieruimte ontsnappen. Er wordt nu door middel van een hogedruk-oliepompje een overmaat olie toegevoerd [7]. De teveel toegevoerde olie wordt afgevoerd via een *regelaar*, welke het verschil tussen de gemiddelde waarden van de oliedruk en de gasdruk constant houdt.

De regelaar kan bestaan uit een buiten de afdichting geplaatste regelklep — tevens veiligheidsklep —, zoals geschetst in fig. 5. De werking is in het onderschrift toegelicht. Een andere mogelijkheid is, het membraan zelf als regelend element te gebruiken, zie *fig. 6*. Hiertoe is de cilinder voorzien van een afvoeropening, welke in de bovenste stand van het membraan gedurende een korte periode vrijkomt. In deze stand is de afvoercapaciteit sterk afhankelijk van zeer geringe lengteveranderingen van het membraan. Een wisselende oliehoeveelheid kan aldus bij nagenoeg constante lengte van het membraan (dus ook constant drukverschil) worden afgevoerd.

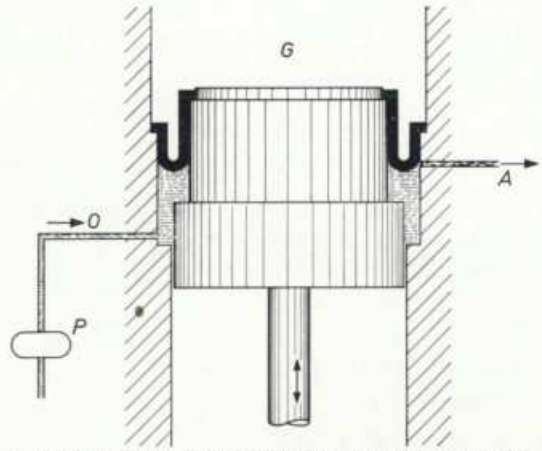


Fig. 6. Zelfregelend rolmembraan met trapjesconstructie. Afhankelijk van de toegevoerde hoeveelheid olie laat het rolmembraan meer of minder olie via een afvoeropening *A* ontsnappen. De lengte blijft dan nagenoeg constant. Deze oplossing is alleen geschikt voor holle rolmembranen.

De zwevende zuiger

De tweede genoemde methode, welke primair tot doel heeft het drukverschil over het rolmembraan constant te houden, is geschetst in *fig. 7*. Deze methode is alleen geschikt voor zuigers. De zuiger is in dit geval voorzien van een in axiale richting beweegbare zuigerdop (vandaar de naam „zwevende zuiger"). Deze zuigerdop is door middel van een veer met de eigenlijke

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

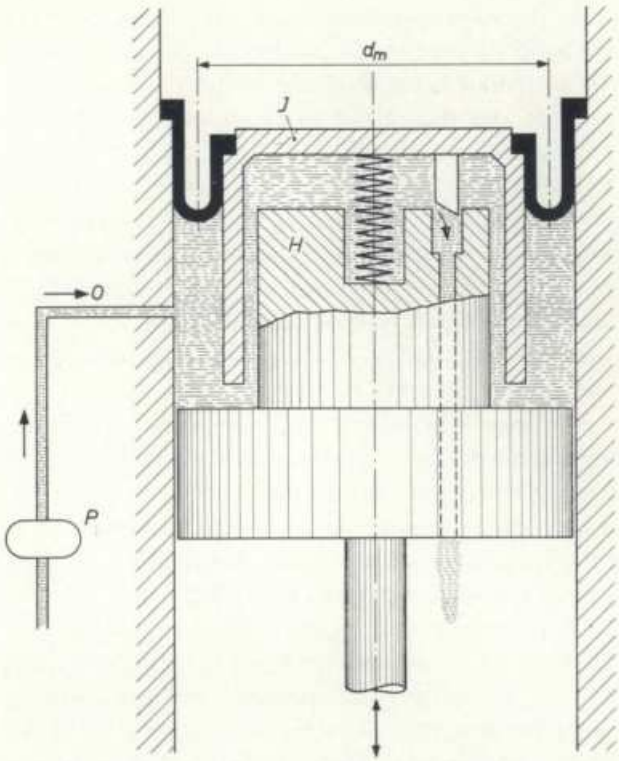


Fig. 7. Rolmembraan met „zwevende zuiger". De losse zuigerdop J vormt met de eigenlijke zuiger H de regelaar. Het drukverschil wordt constant gehouden dank zij de werking van de veer tussen zuiger en zuigerdop. De veerconstante van deze veer is zo klein gekozen dat de veerkracht nagenoeg onafhankelijk is van kleine relatieve bewegingen van de twee zuigerdelen. Deze constructie kan zowel voor bolle als voor holle rolmembranen worden toegepast.

zuiger verbonden. Het rolmembraan (dat weer hol of bol kan zijn) is aangebracht tussen de zuigerdop en de cilinderwand. De rechtgeleiding van de zuigerdop is zodanig uitgevoerd dat de olieruimte onder het membraan in open verbinding staat met de ruimte tussen de zuiger en de zuigerdop.

De olie kan op geheel analoge wijze als in het voorgaande worden toegevoerd. De overtollige olie wordt afgevoerd via een inrichting welke in werking treedt zodra de zuigerdop een bepaalde hoogste stand ten opzichte van de zuiger overschrijdt. Deze afvoerinrichting kan b.v. bestaan uit een poort in de zuigerwand of een regelpen in de zuigerbodem, zoals in fig. 7. De veer is zo gedimensioneerd dat de veerkracht K in de genoemde uiterste stand voldoet aan de betrekking:

$$K = \Delta p \frac{\pi}{4} d_m^2, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

waarin Δp het gewenste drukverschil over het rolmembraan voorstelt. De combinatie zuiger-zuigerdop fungeert dus tevens als regelklep. De trapjes in de olieruimte volgens fig. 5 behoeven in dit geval in het geheel niet nauwkeurig aan de voorwaarde verg. (1) te voldoen, aangezien het volume van de olie toch wel constant kan blijven door een kleine periodieke verplaatsing van de zuigerdop ten opzichte van de zuiger. De daarmee gepaard gaande lengteveranderingen van de veer zullen geen noemenswaardige variaties van de kracht K en dus van het drukverschil over het membraan veroorzaken, mits de veer maar niet te stijf is. Maakt men de veer voldoende slap, dan kan men de trapjesconstructie zelfs geheel achterwege laten, en dit is dan ook in fig. 7 gedaan. Tevens is men nu veel vrijer in de keuze van de olietoevoermiddelen: de olie kan in grote hoeveelheden pulserend worden toegevoerd (plunjerpomp).

Bij de behandeling van de olievrije compressor zullen wij zien hoe deze methode tevens de mogelijkheid biedt om op eenvoudige wijze de schadelijke ruimte van zuigermachines automatisch te regelen.

De doorstroming van de olie, die in beide methodes voorkomt, heeft verversing tot gevolg. Dit heeft twee voordelen. Door diffusie zal er gas onder het rolmembraan kunnen komen; dit zou ertoe kunnen leiden dat de ondersteuning dan niet meer onsamendrukbaar is, wat de werking in gevaar zou brengen, vooral bij de trapjesconstructie. De olieverversing nu zorgt voor de afvoer van dit gas. Voorts kan met de doorstromende olie een koelwerking worden verkregen, die de levensduur van de afdichting ten goede komt.

Met betrekking tot de geleiding van de zuiger kan worden opgemerkt dat zelden een beter gesmeerd zuigerloopvlak zal worden aangetroffen dan onder dit met olie ondersteunde rolmembraan.

Uit het bovenstaande zal het duidelijk zijn dat het afdichtingsprobleem voor een gasruimte nu is teruggebracht tot een afdichtingsprobleem voor een vloeistofruimte, waarbij een zekere mate van lekkage is toegestaan. Hierbij kunnen conventionele technieken worden toegepast, waarbij zonder bezwaar drukverschillen van honderden atmosferen mogen optreden.

Resultaten

Het zal duidelijk zijn dat de afdichting staat of valt met het bestaan van een rubberachtig materiaal (elastomeer) dat aan de gestelde eisen kan voldoen. Deze eisen zijn: grote vermoeiingssterkte, geringe kruip en voldoende weerstand tegen aantasting door de olie en door het gas.

Het geluk was aan onze zijde toen het eerste materiaal dat werd beproefd — een polyurethaanrubber, aanbevolen door het Philips' Kunststoffenlaboratorium —

[7] Voor de olietoevoer biedt ook de zg. pompring, een uitvinding van ir. H. J. Verbeek, Philips' Hoofdindustriegroep Produkten voor Industriële Toepassing, een zeer elegante oplossing. Deze ring, welke in eerste instantie de eigenlijke afdichting van de olieruimte vormt, is zo gevormd dat bij het bewegen van de zuiger een hydrodynamische pompwerking ontstaat waardoor olie rechtstreeks vanuit de drijfwerkruimte in de ondersteuningsruimte wordt gepompt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aan deze eisen goed bleek te voldoen. Bij de beproeving van dit materiaal is gebleken dat er drie parameters zijn die de levensduur in hoge mate bepalen, nl. de temperatuur, het drukverschil over het rolmembraan en de verhouding δ tussen de dubbele membraandikte (d_0) en de spleetbreedte (s). In de *figuren 8* en *9* zijn enige resultaten weergegeven.

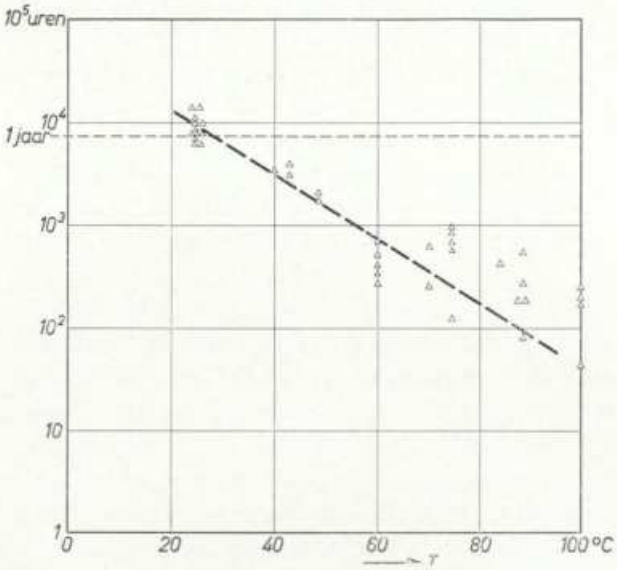


Fig. 8. Levensduur (in uren) van onderzochte rolmembranen van polyurethaanrubber als functie van de temperatuur T. Het drukverschil bedroeg bij deze proeven 4 à 6 atm. Membraandikte bij drukverschil nul $d_0 = 0{,}5$ mm, spleetbreedte $s = 2$ mm, toerental 1500 omw/min, slag 65 mm. De levensduur blijkt sterk af te nemen bij opvoeren van de temperatuur. Bij kamertemperatuur hadden vrijwel alle beproefde membranen een levensduur van meer dan 1 jaar.

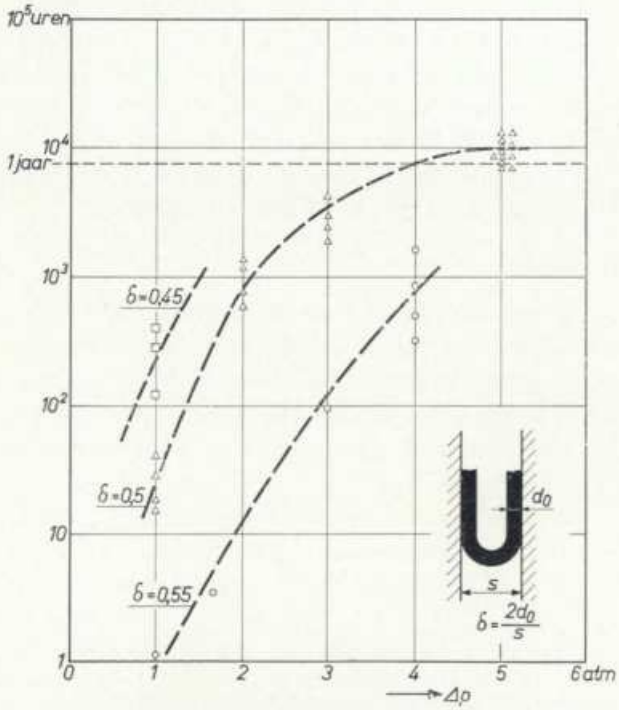


Fig. 9. Levensduur in uren als functie van drukverschil Δp en verhouding δ. Beide grootheden beïnvloeden de amplitude van de periodieke materiaalverlenging tijdens het buigen (zie het Aanhangsel) en daardoor de levensduur.

Men ziet dat de levensduur sterk daalt met toenemende temperatuur (fig. 8). Dit verschijnsel zou verband kunnen houden met de sterke daling van de treksterkte van het materiaal bij hogere temperatuur. Bij 100 °C bedraagt de treksterkte nog slechts 20% van die bij kamertemperatuur. Uit fig. 9 blijkt dat bij een bepaalde temperatuur, naarmate men het drukverschil Δp hoger kiest, tot een zekere grens een aanzienlijk hogere levensduur wordt verkregen. Ook ziet men dat de levensduur bij een bepaald drukverschil nog zeer sterk van δ afhangt. De levensduur bleek onafhankelijk te zijn van het drukniveau.

Ten einde de invloed van Δp en δ te kunnen verklaren, werd getracht door middel van een eenvoudige theorie en berekeningen een inzicht in het verloop van de spanningen en de vervormingen van een rolmembraan te verkrijgen. De desbetreffende beschouwingen vindt men in het *Aanhangsel* van dit artikel.

De resultaten weergegeven in fig. 8 en 9 hebben betrekking op rolmembranen voor een zuigerslag van 65 mm. De testmachines draaiden met een toerental van 1500 omw/min. De langste levensduur, tot heden bereikt, bedraagt 13 000 uur. In deze periode (ongeveer 1,5 jaar) werd het rubber meer dan *twee miljard maal* gebogen.

Het niet toepassen van een wapening in het rolmembraan heeft tot gevolg dat de verhouding tussen slag en diameter niet beperkt is, in tegenstelling tot de conventionele rolmembranen. De afmetingen van de tot heden beproefde rolmembranen variëren van een diameter van 6 mm en een wanddikte van 0,1 mm, in een spleet van 0,4 mm, tot een diameter van 175 mm en een wanddikte van 0,7 mm, in een spleet van 4 mm.

Het onderzoek richt zich thans op materialen welke chemisch bestand zijn tegen diverse agressieve stoffen en die geschikt zijn voor hoge temperaturen. Een en ander is vooral van belang voor compressoren.

Toepassingen

Koudgaskoelmachine

Onder de toepassingen verdient in de eerste plaats vermelding de in de afdeling Koudetechniek van Philips' Hoofdindustriegroep Produkten voor Industriële Toepassing ontwikkelde grote koudgaskoelmachine (type C), waarin de hier besproken afdichting zeer elegant is gecombineerd met een hydraulische zuigeraandrijving. Deze machine wordt in het reeds aangehaalde artikel in dit nummer [3] uitvoerig besproken. In dit geval is het trapjesprincipe toegepast.

Heetgasmotor

In ons laboratorium is een ééncilinder-heetgasmotor gebouwd welke voorzien is van rolmembranen met

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vloeistofondersteuning.

Ook hierbij is het trapjesprincipe toegepast. In *fig. 10* is de machine schematisch weergegeven. De ruimte waarin zich het thermodynamische proces afspeelt, wordt door een zuiger gescheiden van de zg. bufferruimte, welke gevuld is met gas waarvan de druk gelijk is aan de gemiddelde cyclusdruk. Door deze bufferruimte wordt dus het drijfwerk zoveel mogelijk ontlast.

Er zijn vier rolmembranen aangebracht, te weten twee als „uitwendige" afdichting, nl. één op de verdringerstang en één op de zuigerstang, terwijl de andere twee zich bevinden op de zuiger, zoals aangegeven is in fig. 10. Zoals men uit de figuur kan opmaken, bevinden zich alle rolmembranen op kamertemperatuur. De verdringerstang-afdichting en de bovenste zuigerafdichting „voelen" de cyclusdruk, terwijl de zuigerstangafdichting en de onderste zuigerafdichting beide de bufferdruk als gasdruk voelen. De olieruimten van deze beide groepen zijn twee aan twee met elkaar verbonden. Elke groep heeft een eigen oliepomp en regelklep.

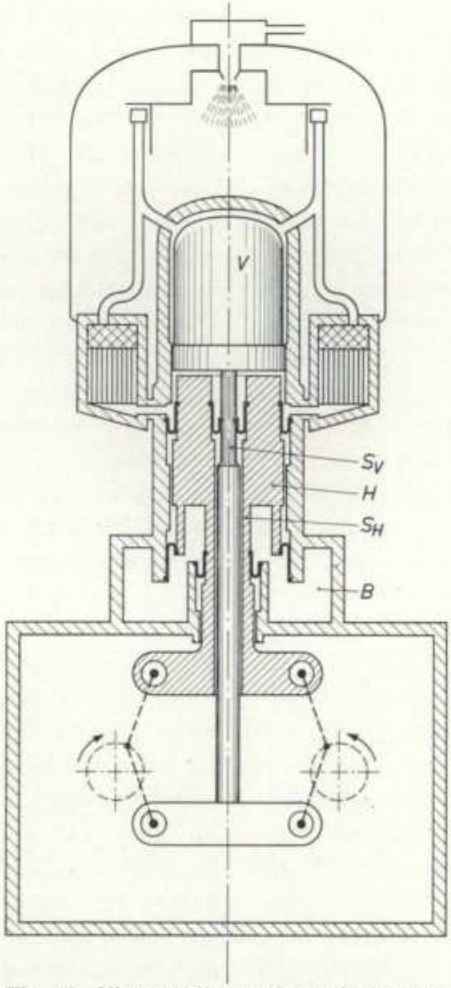
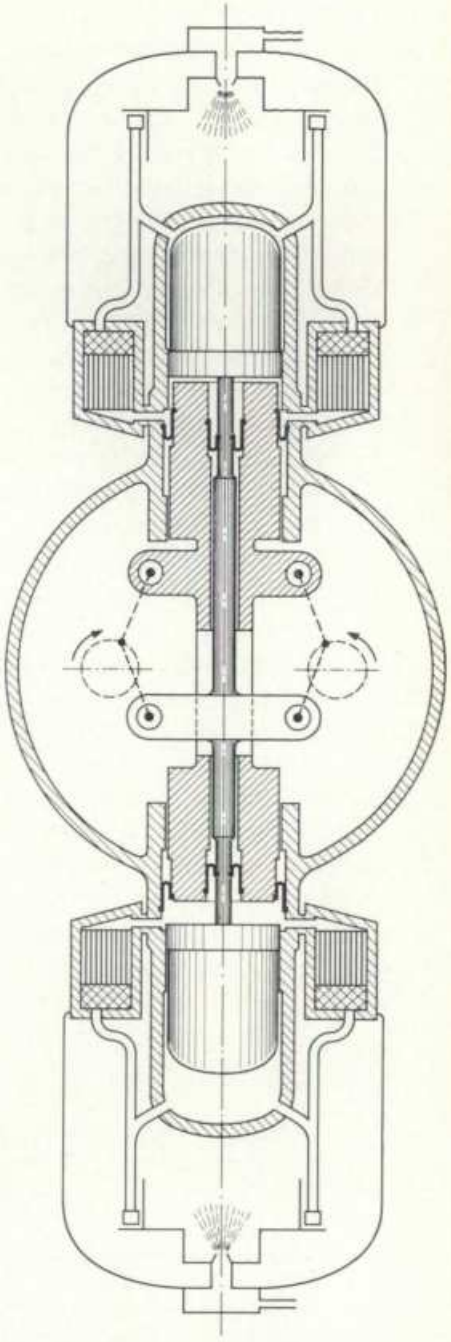


Fig. 10. Uitgevoerde experimentele heetgasmotor, voorzien van vier rolmembranen. Asvermogen 80 pk bij 1500 omw/min. Maximale cyclusdruk 140 atm (waterstof). *H* zuiger. *V* verdringer. S_H zuigerstang. S_V verdringerstang. *B* bufferruimte.



→
Fig. 11. Ontwerp voor een heetgasmotor in boxeruitvoering. De functie van de bufferruimte in fig. 10 (nl. het compenseren van de gemiddelde zuigerkracht) is via een gemeenschappelijke zuigerstang overgenomen door een tweede, identieke cyclus. Het aantal rolmembranen per cyclus is hierdoor tot twee gereduceerd.

De olieruimten van de beide zuigerafdichtingen grenzen in dit geval aan elkaar, maar deze moeten van elkaar gescheiden worden ten einde onderling overlopen van olie te voorkomen. Tussen beide ruimten staat nl. een periodiek wisselend drukverschil met een maximum van ca. 40 atm. De afdichting wordt hier gevormd door een zuigerveer. Ofschoon een zuigerveer in deze toepassing speciale problemen geeft, waarop wij hier niet zullen ingaan, is deze constructie aanvaardbaar gebleken.

De bufferruimte, die in het algemeen moeilijk toegankelijk is, is eigenlijk slechts een onaangename complicatie. Daarom is thans de bouw van een ander type motor in voorbereiding, waarbij de functie van de bufferruimte wordt vervuld door een tweede cyclus. De twee zuigers, welke op een gemeenschappelijke zuigerstang zijn gemonteerd, compenseren nu elkaars gemiddelde zuigerkracht. Het schema van deze „boxermotor" is getoond in *fig. 11*. Het aantal membranen per cyclus is gereduceerd tot twee. Bovendien zijn deze nu alle goed toegankelijk voor montage. Deze constructie is praktisch alleen te realiseren dank zij de hermetische afdichting van de beide zuigers; een conventionele zuigerafdichting zou in dit geval te veel verlies van gas naar de drijfwerkruimte geven. Met conventionele afdichtingen zijn alleen constructies mogelijk waarbij de verbinding tussen de zuigers en het drijfwerk tot stand komt via betrekkelijk dunne stangen en waarbij dus de omtrek van de afdichting klein is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Olievrije compressoren

Onze rolmembraanafdichting zal ook toepassing kunnen vinden in olievrije compressoren. Gezien het grote belang van deze compressoren, speciaal in de kryogene techniek, wordt aan deze toepassing veel aandacht besteed. Er zijn twee experimentele zuigercompressoren met rolmembranen gebouwd, te weten een ééntrapscompressor (persdruk 4 kg/cm², opbrengst ca. 45 normaal m³/h) en een drietrapscompressor (persdruk 150 kg/cm², opbrengst ca. 30 m³/h). Beide machines zijn dank zij het toepassen van „bolle sokken" geschikt voor onderatmosferische aanzuigdruk en zijn gebouwd volgens het principe van de zwevende zuiger. Zij onderscheiden zich, afgezien van de vermelde gegevens, slechts door constructieve details van elkaar. Wij bespreken hier dan ook slechts de ééntrapscompressor. In *fig. 12* is deze machine schematisch weergegeven.

De zuiger *1* is voorzien van een zuigerdop *2*, welke in dit geval een zeer groot verplaatsingstraject ten opzichte van de zuiger heeft. Hierdoor is de mogelijkheid geschapen om de schadelijke ruimte (d.i. de overblijvende cilinderruimte als de zuiger in de hoogste stand staat) en daarmee de opbrengst van de machine tijdens het bedrijf naar behoefte te regelen. De zuiger en de zuigerdop zijn met elkaar verbonden door een veer *3*. De olie wordt geleverd door een in de zuiger aangebrachte plunjerpomp *4*. De olie wordt door deze pomp naar de ruimte tussen de zuiger en de zuigerdop gevoerd. Vandaar stroomt ze langs de binnenzijde van de dopwand naar het rolmembraan. De zuigerdop wordt zodoende intensief gekoeld. Bij *5* is een overstort aangebracht, welke opent als de zuigerdop een bepaalde hoogste stand ten opzichte van de zuiger bereikt. De olie kan echter ook via de leiding *6* naar een regelklep *7* stromen. Deze regelklep wordt primair bestuurd door de druk $\hat{p}$ in het persvat *8*, en wel zodanig dat de klep sluit zodra de druk $\hat{p}$ beneden een bepaalde instelbare waarde daalt, en omgekeerd. Hierdoor wordt de schadelijke ruimte dus voortdurend naar behoefte ingesteld. Het vereiste drukverschil over het rolmembraan mag door deze regeling niet in het gedrang komen; daarom is tevens een voorziening in de regelklep *7* aangebracht die ervoor zorgt dat het genoemde drukverschil niet beneden een bepaalde waarde kan dalen (het bovendeel van *7*). Uiteraard kan deze regelklep ook primair door een andere grootheid worden bestuurd. De regelklep vormt een extra-voorziening en kan desgewenst weggelaten worden, waarbij de regelbaarheid dus vervalt.

Wanneer de machine wordt gestopt, zal de olie in eerste instantie langs de zuiger weglekken naar de krukkast, waarbij de zuigerdop geleidelijk in de uitgangsstand terugkeert onder invloed van de veer *3* en een eventueel in de compressieruimte aanwezige gasdruk. In deze uitgangsstand wordt een O-ring *9*, welke zodanige afmetingen heeft dat hij de cilinderwand tijdens het bedrijf niet raakt, ovaal gedrukt. Hierdoor wordt de zuigerspleet hermetisch afgesloten en er blijft dus een bepaalde hoeveelheid olie binnen het nog gespannen rolmembraan. De machine staat nu dus direct gereed voor de volgende start. Daarbij wordt met maximale schadelijke ruimte en dus min of meer onbelast aangelopen.

Deze ééntrapscompressor heeft nu ruim 4000 uur onafgebroken gelopen met een toerental van 1500 omw/min. Met de drietrapscompressor is nog slechts kort geleden een duurproef begonnen.

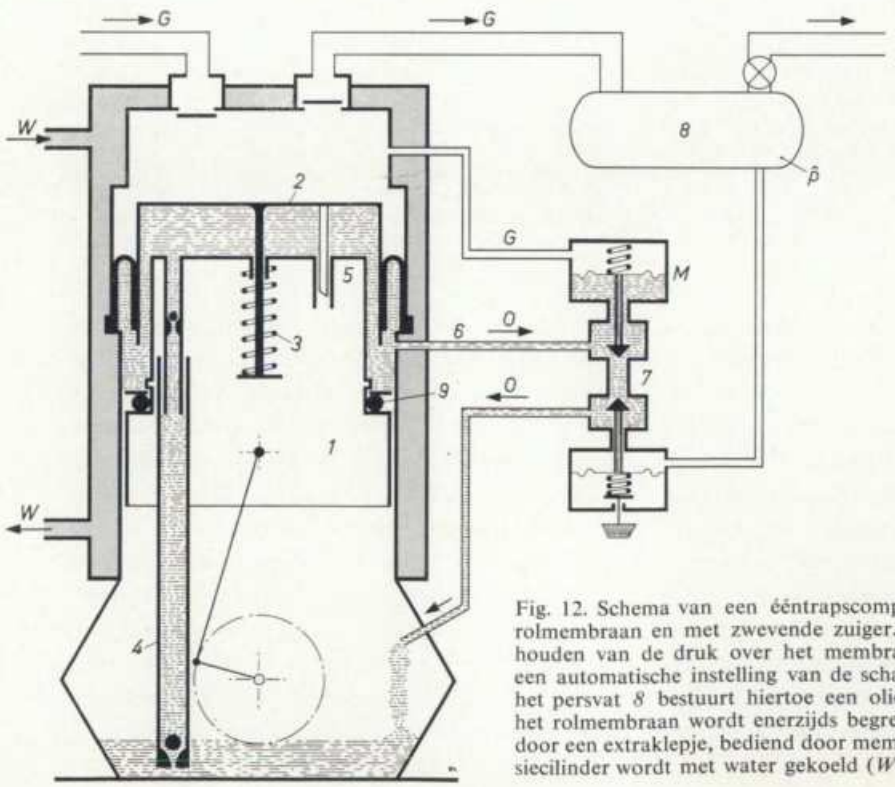


Fig. 12. Schema van een ééntrapscompressor met afdichting door een bol rolmembraan en met zwevende zuiger. Het regelsysteem voor het constant houden van de druk over het membraan is zo uitgevoerd dat men tevens een automatische instelling van de schadelijke ruimte krijgt. De druk $\hat{p}$ in het persvat *8* bestuurt hiertoe een olieafvoerklep *7*. Het drukverschil over het rolmembraan wordt enerzijds begrensd door de overstort *5* en anderzijds door een extraklepje, bediend door membraan *M* in de regelaar. De compressiecilinder wordt met water gekoeld (*W*).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Aanhangsel: de spanningen in het rolmembraan

Uit de algemene spanningsleer weet men dat elke spanningstoestand beschreven kan worden door een stelsel onderling loodrechte zg. hoofdspanningen; zie *fig. 13*. We noemen deze spanningen σ_x, σ_y en σ_z, waarbij de indices de richtingen aangeven waarin de spanningen werken. Deze spanningen definiëren wij in ons geval als kracht per oppervlakte-eenheid van het vervormde lichaamselementje. De vlakken waarop hoofdspanningen werken, zijn gekenmerkt door het feit dat in deze vlakken geen schuifspanningen werken. De relatieve vervorming (afmeting na vervorming gedeeld door de oorspronkelijke afmeting) in de richtingen x, y en z noemen we λ_x, λ_y en λ_z. Gaan wij uit van een eenheidskubus, dan zijn λ_x, λ_y en λ_z dus tevens de nieuwe ribben van het vervormde lichaam.

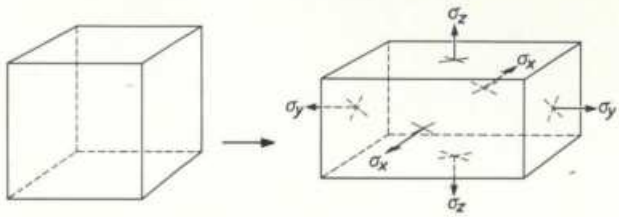


Fig. 13. Vervormde eenheidskubus onder invloed van de hoofdspanningen σ_x, σ_y, σ_z.

Het elastisch gedrag van een elastomeer laat zich vrij nauwkeurig beschrijven door de volgende vergelijkingen:

$$\lambda_x\lambda_y\lambda_z = 1, \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= Ce^{\lambda_x} - p, \\ \sigma_y &= Ce^{\lambda_y} - p, \\ \sigma_z &= Ce^{\lambda_z} - p. \end{aligned}\right\} \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

Verg. (3) geeft rekenschap van de uiterst geringe samendrukbaarheid van dit soort materiaal. C is een materiaalconstante (in ons geval 9,2 kg/cm²) [8], terwijl p is op te vatten als een „hydrostatische druk" van het materiaal. p is een functie van σ_x, σ_y en σ_z. Voor $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0$ is $p = Ce$.

Wij beschouwen nu eerst de spanningen in het gestrekte deel van een ondersteund rolmembraan (zie *fig. 14*), waarop aan de ene zijde een druk p_1 heerst, terwijl in het ondersteuningsmedium p_2 heerst ($p_1 > p_2$). De afmetingen en oriëntaties zijn in de figuur aangegeven. We veronderstellen dat $s \ll D$, zodat de rek in omtrekrichting verwaarloosbaar klein is. (De verwaarlozing wordt gerechtvaardigd door de uitkomsten van de berekening, die aantonen dat de in de praktijk optredende rek in omtrekrichting vele malen wordt overtroffen door de rekken die in andere richtingen optreden.) Er kan dus worden gesteld $\lambda_z = 1$. Voor een reep ter breedte 1, loodrecht op het vlak van tekening, kan nu geschreven worden (verticaal evenwicht):

$$2d\sigma_x + p_2 s = p_1(s - 2d),$$

of

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{2d}{s}(\sigma_x + p_1). \qquad \ldots \quad (5)$$

Hierin is aangenomen dat de wand geen schuifkracht op het rolmembraan uitoefent. Het is dan eenvoudig in te zien dat in de rechte delen van het rolmembraan de hoofdspanningen in de aangegeven x-, y- en z-richting zijn georiënteerd, en in dit geval geldt dat de hoofdspanning $\sigma_y = -p_1$. Voorts merken wij op

[8] Thermische effecten en kruip worden in deze theorie niet in rekening gebracht. De vermelde kwantitatieve gegevens gelden voor kamertemperatuur. — In de literatuur vindt men in plaats van verg. (4) de formule $\sigma_i = C'\lambda_i^2 - p$ (met $i = x, y, z$). Deze vorm geldt slechts bij benadering tot $\lambda = 2$ (d.i. 100% rek).

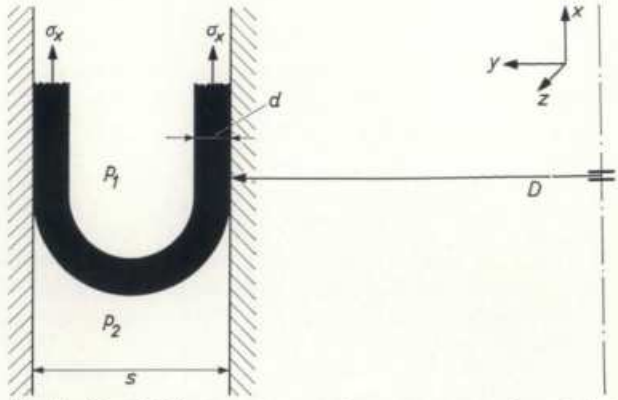


Fig. 14. Ter afleiding van de spanningen en vervormingen in het rechte deel van een rolmembraan.

dat $d = \lambda_y d_0$, waarin d_0 de oorspronkelijke (ongespannen) dikte van het rolmembraan voorstelt. Maken wij voorts gebruik van de betrekking (3) met $\lambda_z = 1$ en van (4), dan gaat (5) over in:

$$\Delta p = \delta C \frac{e^{\lambda_x} - e^{1/\lambda_x}}{\lambda_x}, \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

waarbij δ is gedefinieerd als:

$$\delta = \frac{2d_0}{s}. \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Uit metingen bij kamertemperatuur aan een rolmembraan met $\delta = 0{,}5$ bleek dat (6) vrij nauwkeurig met de werkelijkheid overeenstemt.

In (6) blijkt alleen het drukverschil voor te komen, niet het absolute drukniveau. Voor de vervorming van het gebogen deel van het membraan, dat we nu gaan beschouwen, wordt iets analoogs gevonden. Het elastische gedrag van het rolmembraan zal dus niet afhangen van het drukniveau waarop het proces zich afspeelt — een conclusie die door de experimenten wordt bevestigd.

Voor de beschouwing van het gebogen deel van het rolmembraan (zie *fig. 15*) maken we twee veronderstellingen. Ten eerste verwaarlozen wij weer de omtreksrek ($s \ll D$). Voorts nemen wij aan dat het gebogen deel cirkelvormig is. In dit geval zijn de hoofdoriëntaties x, y en z zoals aangegeven in fig. 15. We kunnen nu weer stellen $\lambda_z = 1$, dus $\lambda_x\lambda_y = 1$. Voor een klein partje met afmeting 1 loodrecht op het vlak van tekening en met de verdere afmetingen $r\,d\varphi$ en dr kan nu als krachtenevenwicht in y-richting (r-richting) geschreven worden:

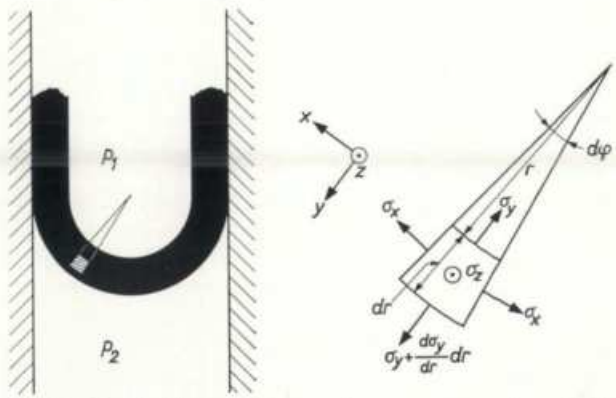


Fig. 15. Ter afleiding van de spanningen en vervormingen in het gebogen deel van een rolmembraan. Het in de linkerschets aangegeven volume-element is rechts vergroot weergegeven. De hoofdspanningen hierin hebben de ernaast aangegeven richtingen x, y, z.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

$$\sigma_x \, dr \, d\varphi = \frac{d}{dr} (\sigma_y r \, d\varphi) dr$$

of

$$\sigma_x - \sigma_y = r \frac{d\sigma_y}{dr}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Voor λ_x geldt in dit geval:

$$\left.\begin{aligned} \lambda_x &= \pi r / l_0, \\ \lambda_y &= l_0 / \pi r. \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

dus

Hierin is l_0 de van r onafhankelijke oorspronkelijke „vezellengte" van het materiaal dat de bocht vormt; l_0 hangt alleen af van de randvoorwaarden van het probleem. Met behulp van (4), (8) en (9) krijgen we:

$$\frac{d\sigma_y}{dr} = \frac{C}{r} (e^{\pi r/l_0} - e^{l_0/\pi r}). \quad \ldots\ldots \quad (10)$$

De randvoorwaarden luiden:

$$\left.\begin{aligned} \sigma_y &= -p_2 \quad \text{voor} \quad r = \tfrac{1}{2}s, \\ \sigma_y &= -p_1 \quad \text{voor} \quad r = r_i, \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11)$$

waarin r_i de binnenstraal van de bocht voorstelt. Bedenken we voorts dat nu niet meer, zoals in fig. 14, eenvoudig geldt $d_0 = d/\lambda_y$, maar:

$$d_0 = \int_{r_i}^{\frac{1}{2}s} \frac{1}{\lambda_y} \, dr = \int_{r_i}^{\frac{1}{2}s} \lambda_x \, dr,$$

dan volgt met behulp van (9) en (7):

$$r_i = \tfrac{1}{2}s \sqrt{1 - \frac{4\delta l_0}{\pi s}}. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (12)$$

Door numerieke integratie van (10) en gebruikmaking van (9), (11) en (12) kunnen nu de onbekenden λ_x en λ_y, en zo men wil σ_x, σ_y en σ_z, als functie van Δp, δ en r berekend worden.

In *fig. 16* hebben we de op deze wijze berekende vervormingen λ_x voor het rechte deel (die, zoals reeds gezegd, ook door metingen bevestigd zijn) en de vervormingen voor het binnen- en buitenoppervlak van het rolmembraan in de bocht als functie van Δp uitgezet voor twee waarden van δ. Bij het op- en afrollen van het membraan zal een volume-element aan het binnenoppervlak een vervorming (verlenging) λ_x ondergaan die periodiek tussen de curve voor het rechte deel en de desbetreffende curve voor de bocht wisselt, en analoog voor elk volume-element aan het buitenoppervlak. De verschillen tussen de respectievelijke curven zijn dus bepalend voor een eventuele vermoeidheid van het rolmembraan (voor volume-elementen *binnen* het membraan zijn de vervormingen in ieder geval kleiner dan aan de oppervlakken).

Uit fig. 16 kunnen we nu in de eerste plaats concluderen dat, bij een gegeven drukverschil Δp, de periodieke vervorming zowel op binnen- als op buitenoppervlak kleiner zal zijn naarmate δ kleiner gekozen is. Dit klopt met het blijkens fig. 9 experimenteel gevonden feit dat membranen met kleinere δ langer meegaan.

Bij toeneming van Δp worden de periodieke vervormingen aan het buitenoppervlak geleidelijk kleiner, terwijl die aan het binnenoppervlak niet veel veranderen of iets toenemen. Dit resultaat van de theorie dient in verband gebracht te worden met twee experimentele feiten: ten eerste, dat bij de levensduurproeven de rolmembranen altijd het eerst aan het *buitenoppervlak* bezwijken: daar treden, zowel bij holle als bij bolle membranen, de eerste breuken op (waarbij het breukvlak steeds loodrecht op de x-richting is georiënteerd); ten tweede, dat blijkens fig. 9 de levensduur met toenemende Δp toeneemt. De conclusie is, dat *de levensduur niet alléén door de vervormingsgrenzen* bepaald kan zijn; men ziet dit als volgt. Bij een bepaald laag drukverschil $(\Delta p)_1$ varieert de vervorming van het buitenoppervlak tussen de in fig. 16 met de dubbelpijl aangegeven grenzen; na zekere tijd zal dit oppervlak

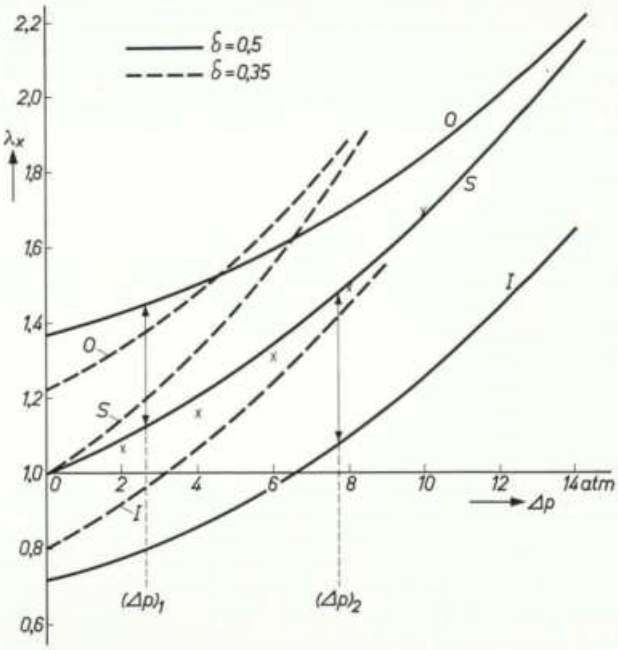


Fig. 16. Theoretisch verloop van de vervorming λ_x in het rechte deel (S) en op binnen- en buitenoppervlak (resp. I en O) van het gebogen deel van een rolmembraan, als functie van het drukverschil Δp, voor twee waarden van δ, bij kamertemperatuur. De kruisjes geven meetresultaten voor het rechte deel bij $\delta = 0{,}5$ weer.

het begeven. Bij het veel hogere drukverschil $(\Delta p)_2$ varieert de vervorming van het *binnen*oppervlak tussen vrijwel diezelfde grenzen, maar dit leidt na dezelfde tijd *niet* tot bezwijken, het membraan leeft bij die Δp veel langer, en het bezwijkt ten slotte weer aan het *buiten*oppervlak.

Wat dan wèl bepalend is voor de levensduur, kan nog niet met zekerheid worden gezegd. Het feit dat steeds het buitenoppervlak het eerst bezwijkt, zou erop wijzen dat het verschil in *karakter* van de vervorming een rol speelt: bij het buitenoppervlak wordt tijdens het afrollen de permanent aanwezige rek kortstondig vergroot, bij het binnenoppervlak wordt hij kortstondig verminderd. Een ander verschilpunt tussen buiten- en binnenoppervlak is het volgende: de periodieke overgang van recht naar krom en vice versa gaat bij het buitenoppervlak gepaard met resp. een verbreken en herstellen van het contact tussen het membraan en de zuiger- of cilinderwand. Daarbij is een plaatselijke schuiving van het membraan over de wand onvermijdelijk, en deze schuiving zal de levensduur zeker nadelig beïnvloeden. De schuiving zal groter zijn naarmate de periodieke vervormingsverandering groter is, hij zal dus blijkens fig. 16 afnemen met toenemende Δp. Dit is in overeenstemming met wat fig. 9 te zien gaf: hoe groter Δp, des te langer de levensduur.

Samenvatting. Het reeds lang bekende rolmembraan voor de hermetische afdichting van een zuiger of stang blijkt voor grote drukverschillen gebruikt te kunnen worden door het te ondersteunen met een vloeistofkussen. De constructie moet zodanig zijn dat het membraan bij het op- en afrollen nagenoeg niet van lengte verandert. Twee mogelijke constructies hiervoor worden beschreven, nl. de trapjesconstructie en de zwevende zuiger; beide worden voorzien van regelinrichtingen om het drukverschil over het membraan (en daarmee de membraanlengte) zeer constant te houden. Met membranen van polyurethaanrubber zijn op deze wijze buitengewoon lange levensduren bereikt (meer dan 2 miljard maal op- en afrollen, bij 1500 maal per minuut). De invloed van diverse parameters is nagegaan en kan ook theoretisch worden begrepen. Als toepassingen worden genoemd de afdichtingen in een koudgaskoelmachine, een heetgasmotor en een olievrije compressor. De laatstgenoemde wordt iets nader beschreven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een koudgaskoelmachine met hydraulische zuigeraandrijving voor industriële toepassingen

A. A. Dros

621.573

Aan de bestaande soorten Philips koudgaskoelmachines is een nieuwe toegevoegd, die een groot koelvermogen paart aan grote betrouwbaarheid en een zeer hoog rendement (ruim 1,3 maal dat van de kleinere types). Deze eigenschappen zijn verkregen door toepassing van nieuwe ideeën op constructief gebied, die aan de machine een nogal ongewoon aanzien hebben gegeven. Het artikel zet de logica achter dit revolutionaire ontwerp uiteen.

Koudgaskoelmachines, werkende volgens het Stirling-proces, worden reeds geruime tijd door Philips gefabriceerd. In vele laboratoria, verspreid over de gehele aardbol, worden de kleine eencilindermachine (type A) en een viercilinderversie hiervan (type B) gebruikt voor het opwekken van koude bij zeer lage temperaturen.

Ook de industrie begint de laatste jaren een groeiende belangstelling te tonen voor deze machines, die uitmunten door eenvoud van bediening, compactheid en rustige werking, bij een goed rendement. Voor de industrie worden echter wat betreft rendement, betrouwbaarheid bij continu bedrijf en lage onderhoudskosten nog stringentere eisen gesteld. Bovendien heeft de industrie in het algemeen behoefte aan grotere capaciteiten per eenheid.

Bij Philips is enkele jaren geleden de ontwikkeling ter hand genomen van een grote koudgaskoelmachine die aan deze zwaardere eisen van de industrie tegemoet komt. Evenals de viercilindermachine type B is ook de nieuwe machine (type C) ontworpen en ontwikkeld door de Hoofdindustriegroep PIT (Produkten voor Industriële Toepassing).

Tijdens deze ontwikkeling won de overtuiging veld dat de voor kleine koudgaskoelmachines beproefde principes niet klakkeloos voor een grote machine moesten worden toegepast. Inmiddels verworven diepere kennis van de theorie van het Stirling-proces en nieuw opgekomen ideeën op constructief gebied leidden tot het inslaan van geheel nieuwe wegen. Het resultaat van het volgen van de nieuwe koers is een machine die bij vergelijking met de machine van type B wellicht enigszins revolutionair aandoet; zie *fig. 1* en *2*. De machine overtreft die van type B aanzienlijk in capaciteit en rendement: het koelvermogen bij 77 °K is 20 kW, het relatief rendement (betrokken op het Carnot-rendement) is meer dan 41 %, tegenover waar-

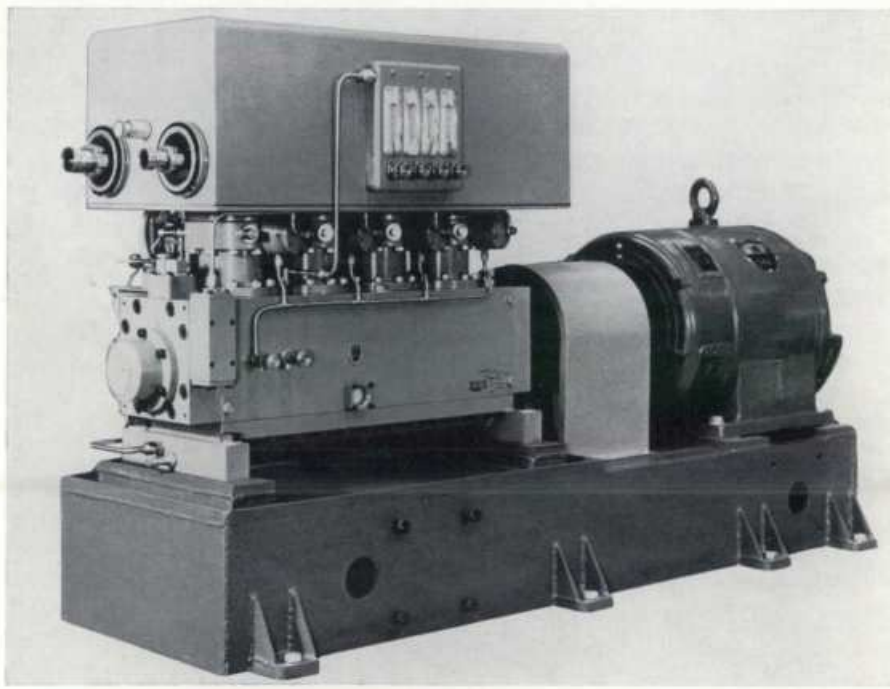


Fig. 1. Philips koudgaskoelmachine type B. Deze viercilindermachine, die veel gebruikt wordt in grote laboratoria, heeft bij 77 °K en een koelwatertemperatuur van 15 °C een koelvermogen van 3,8 kW. Het relatieve rendement (betrokken op het Carnot-rendement) is daarbij $\eta/\eta_C = 30\%$. (Zie ook de afbeelding van een produktiecentrum voor vloeibare stikstof in Philips techn. T. **25**, 348, 1963.)

Ir. A. A. Dros is medewerker van Philips' Hoofdindustriegroep Produkten voor Industriële Toepassing, Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

den van resp. 3,8 kW en ca. 30% bij de machine van type B. Enkele verdere gegevens van de nieuwe machine zijn in het bijschrift van fig. 2 vermeld. De aflevering van de eerste serie van deze machines is nu begonnen.

Voor een goed begrip van de werking en de bouw van de nieuwe machine, die we nu willen beschrijven, is het nuttig nog even het principe van het Stirling-proces, in gestyleerde vorm, te recapituleren [1].

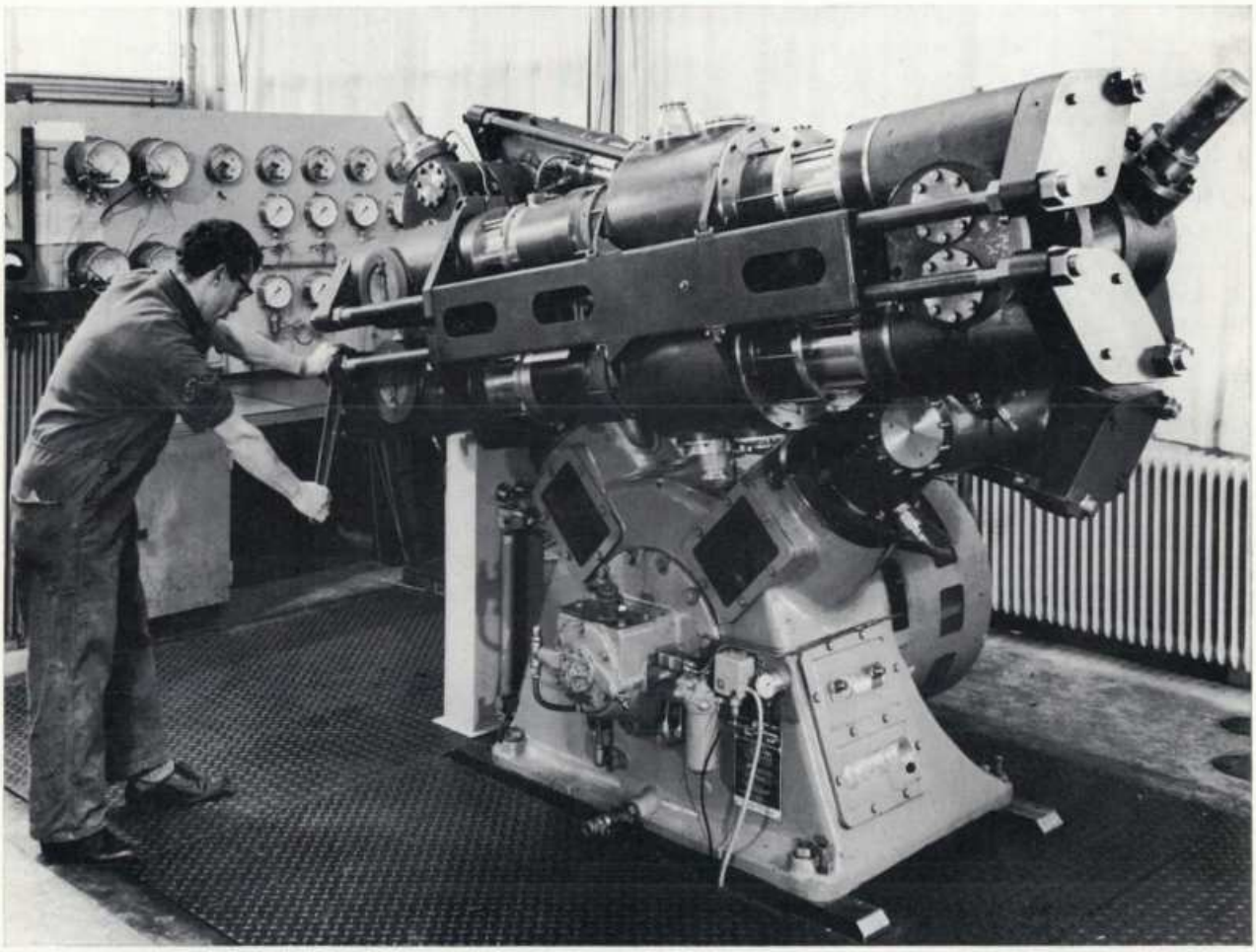


Fig. 2. De nieuwe koudgaskoelmachine, type C. Deze machine heeft bij 77 °K en een koelwatertemperatuur van 15 °C een koelvermogen van 20 kW en een relatief rendement van ruim 41%. Verdere gegevens: maximaal asvermogen 134 kW, toerental 585 omw/min, koelwaterverbruik 20 m³/h, gewicht ca. 6000 kg.

Recapitulatie van het Stirling-proces

We laten het gestyleerde proces zich afspelen in een cilinder, gevuld met een gas en voorzien van twee zuigers, als geschetst in *fig. 3a*. De rechterzuiger werkt in een cilindergedeelte met de hoge temperatuur T_C, de linkerzuiger in een gedeelte met de lage temperatuur T_E. Het proces verloopt in vier fazen. Faze *I* heeft plaats tussen de getekende toestanden *1* en *2*: het gas wordt bij de temperatuur T_C gecomprimeerd. De compressiewarmte voeren we ter plaatse af, zodat deze faze isotherm verloopt. In faze *II* wordt het gas via de tussengelegen regenerator *Reg* overgebracht naar het cilindergedeelte waar de lagere temperatuur T_E heerst (toestand *3*). Tijdens deze faze staat het gas warmte af aan de regenerator. In faze *III* expandeert het gas bij de temperatuur T_E (toestand *4*). Deze faze verloopt weer isotherm, doordat we de expansiekoude ter plaatse afvoeren. Ter voltooiing van de cyclus wordt tijdens faze *IV* het gas via de regenerator naar het rechter cilindergedeelte teruggebracht, waarbij het gas de tijdelijk in de regenerator opgeslagen warmte weer opneemt. Hierbij wordt weer toestand *1* bereikt.

Het gas stroomt dus bij dit proces gedurende elke cyclus heen en weer tussen de beide ruimten met de temperaturen T_C en T_E. In het p-V-diagram, fig. 3*b*, wordt het gestyleerde proces beschreven door twee isothermen *I* en *III* en b.v. twee isochoren *II* en *IV* (in plaats van isochoren kan men ook isobaren aannemen [2]). Past men het proces toe voor een koel-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

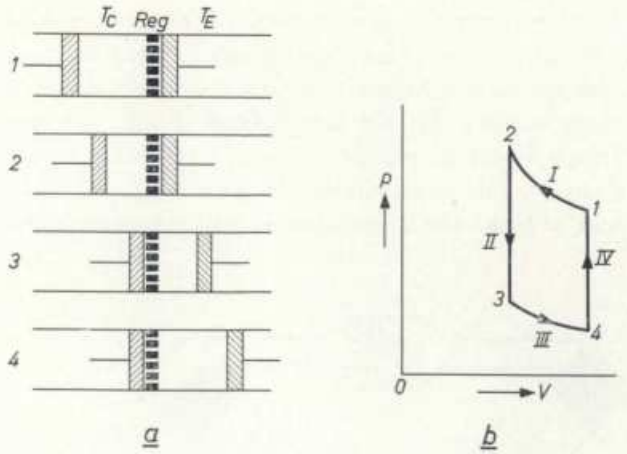


Fig. 3. Ter recapitulatie van het (gestyleerde) koudgaskoelproces. *a*) De vier fazen van de zuigerbeweging. *b*) Het *p-V*-diagram, bestaande uit twee isothermen *I* en *III* en twee isochoren (lijnen van constant volume) *II* en *IV*. (In plaats van isochoren zou men ook isobaren mogen aannemen.)

machine, dan houdt men de warme ruimte (temperatuur T_C) ongeveer op kamertemperatuur en maakt een nuttig gebruik van de koude geproduceerd in faze *III*.

Over het essentiële belang dat de regenerator heeft voor het rendement van het proces zullen we hier niet uitweiden. Er zij alleen op gewezen dat men bij de constructie erop uit moet zijn te zorgen dat het gas bij het stromen door de regenerator de hieraan afgegeven warmte resp. koude zo volledig mogelijk weer opneemt. Kleine tekortkomingen in deze herwinning kunnen al fnuikend zijn voor het rendement van de machine.

In de beschreven vorm, met discontinu bewegende zuigers, kan het Stirling-proces moeilijk worden verwezenlijkt. Men kan echter het proces, zonder dat het nuttig effect essentieel minder wordt, ook laten verlopen met een harmonische beweging van de zuigers. De bewegingen van de beide zuigers moeten zodanig in faze verschillen dat de volumevariatie van de expansieruimte in faze vóór is (bij voorbeeld 90°) ten opzichte van de variatie van de compressieruimte.

De constructieve verwezenlijking van het Stirling-proces

Traditionele oplossingen

Machines ter realisering van het Stirling-proces kunnen op velerlei wijze worden geconstrueerd. We zullen de constructie van onze machine stapsgewijze trachten duidelijk te maken door een aantal mogelijke oplossingen te bekijken.

In *fig. 4* is schematisch een zeer oude oplossing voor een Stirling-machine aangegeven. Wij zien hierin de twee zuigers *C* en *E* (resp. compressie- en expansiezuiger) met daartussen de regenerator *Reg*, waartegen aan weerszijden warmtewisselaars zijn aangebracht: aan de kant van de compressiezuiger bevindt zich de *koeler*, waarin de compressiewarmte aan de omgeving (koelwater) wordt afgestaan, en aan de kant van de expansiezuiger de *koudewisselaar* (ook wel „vriezer" genoemd), waarin de nuttige expansiekoude wordt afgevoerd. Beide zuigers worden bewogen door een krukas, voorzien van twee krukken (krukhoek 90°), door middel van scharnierende hefbomen en stangen.

Ofschoon het thermodynamische gedeelte van deze Stirling-machine — waarmede bedoeld is het gedeelte bestaande uit de gasruimte met de warmtewisselaars en de twee zuigers — het eenvoudigste denkbare arrangement te zien geeft, is het drijfwerkgedeelte, met zijn vele onderdelen en scharnierpunten, uit constructief oogpunt nauwelijks aanvaardbaar. Daarbij komt nog een ander ernstig bezwaar. Wij laten, ter wille van een grote koudeproduktie per liter slagvolume, het Stirling-proces zich afspelen bij zeer hoge drukken van het werkmedium [1], b.v. tijdens een cyclus wisselend tussen 25 en 50 atm. Dit betekent dat de zuigers voortdurend met grote kracht van elkaar af worden gedrukt. Men moet het drijfwerk zoveel mogelijk van deze krachten ontlasten, en men zou dit kunnen doen door het drijfwerk te plaatsen in een carter van voldoend groot

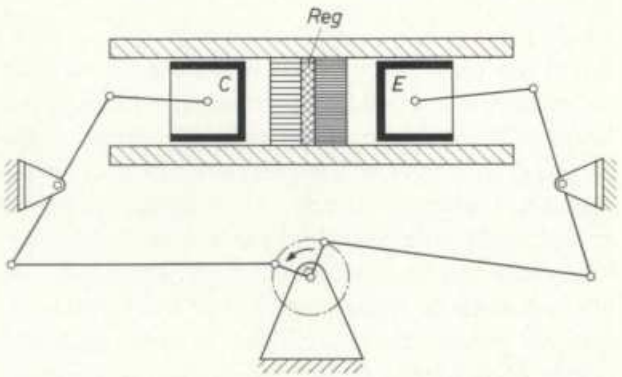


Fig. 4. Een der oudste voorstellen voor de realisatie van het Stirling-proces. Compressiezuiger *C* en expansiezuiger *E* worden via een stangenstelsel gedreven door een krukas met twee krukken (krukhoek 90°). Tussen de zuigers bevinden zich de procesruimten en de warmtewisselaars aan weerskanten van de regenerator (*Reg*).

volume waarin een gasdruk heerst gelijk aan het gemiddelde drukniveau van het proces. Er is nu weinig fantasie voor nodig om in te zien dat voor een drijfwerk als geschetst in fig. 4 het bouwen van een carter, dat drukken moet weerstaan van b.v. 35 atm en daarbij slechts zeer weinig mag vervormen (o.a. wegens de uitlijning van de diverse lagers), constructief grote moeilijkheden zou opleveren.

---

[1] Voor een uitvoeriger behandeling van het Stirling-proces, toegepast voor een koelmachine, zie: J. W. L. Köhler en C. O. Jonkers, Philips techn. T. **16**, 33-43, 1954; J. W. L. Köhler, Progress in Cryogenics **2**, 41-67, 1960.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Aantrekkelijker lijkt daarom een oplossing als geschetst in *fig. 5a*. Het drijfwerk heeft hier de van velerlei machines (o.a. compressoren) bekende V-vorm. Dit drijfwerk is uitermate eenvoudig, en de ontlasting van het drijfwerk kan hier veel gemakkelijker worden verkregen, hetzij door een drukvaste uitvoering van het carter, dat hier immers betrekkelijk klein is en cilinderisch van vorm, hetzij — wat voor grote machines de voorkeur zou verdienen — door voor het drijfwerk een kruishoofdmachine te kiezen en onder elk der beide zuigers *C* en *E* een met gas onder druk gevulde bufferruimte aan te brengen (zie fig. 5*b*). In thermodynamisch opzicht echter is de oplossing van fig. 5*a* of *b* om tweeërlei redenen inferieur aan die van fig. 4. Ten eerste is de afstand tussen de zuigers *C* en *E* zeer groot geworden, met als gevolg een relatief veel grotere schadelijke ruimte. Ten tweede is de configuratie van de totale werkruimte niet meer rotatiesymmetrisch. Dit brengt het gevaar mee dat het gas, bij het heen en weer stromen, de regenerator ongelijkmatig verdeeld over diens doorsnede passeert, wat het wederopnemen van de opgeslagen warmte resp. koude benadeelt.

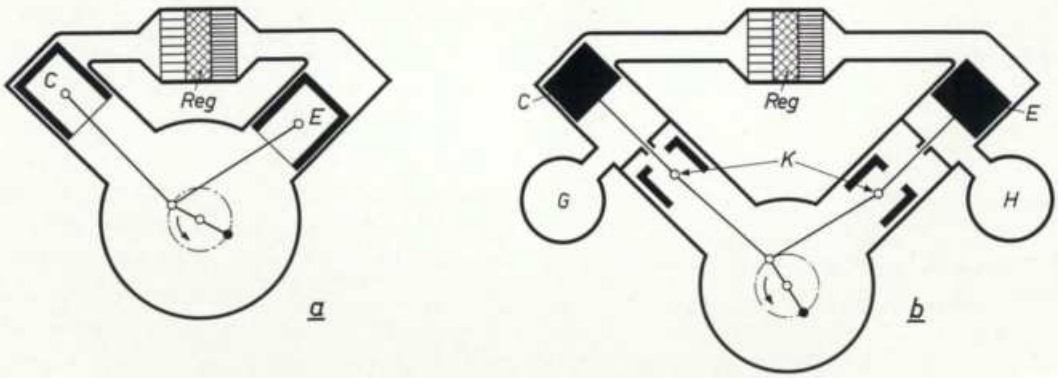


Fig. 5. *a*) Realisatie van het Stirling-proces met behulp van een V-drijfwerk.
b) Ter ontlasting van de zuigers zijn hieronder bufferruimten *G* en *H* aangebracht, die met gas onder de gemiddelde procesdruk worden gevuld. Het V-drijfwerk is hierbij uitgerust met kruishoofden *K*.
Thermodynamisch is het arrangement van procesruimten en zuigers hier minder gunstig dan in fig. 4.

Minder gunstig dan de opstelling volgens fig. 4 is ook de bekende opstelling met verdringer, die voor de *kleine* koudgaskoelmachine een goede oplossing bood. Dit wordt op blz. 364 nader toegelicht.

Een nieuw principe: hydraulische zuigeraandrijving

Voortbouwend op het V-drijfwerk in de kruishoofdvorm, zijn wij gekomen tot een gedachte waardoor de eenvoud van dit drijfwerk wordt gecombineerd met de ideale vorm van het thermodynamische gedeelte van de eerstbeschouwde oplossing. In *fig. 6* is het principe geschetst: de beide zuigers *C* en *E* worden niet direct mechanisch gedreven doch *hydraulisch, door middel van heen-en-weergaande oliekolommen*. De oliekolommen worden op hun beurt in beweging gebracht door plunjers (*D* en *F*), die zijn gemonteerd op de beide zuigerstangen van het kruishoofddrijfwerk. De oliekolom, opgesloten tussen zuiger en plunjer (b.v. tussen *C* en *D*), kan men opvatten als een stang die de bocht kan volgen. Het thermodynamische gedeelte is nu identiek met dat van fig. 4, het eigenlijke drijfwerk met dat van fig. 5*b*.

Bij de nadere uitwerking van deze gedachte zijn wij nog twee stappen verder gegaan.

In de eerste plaats blijkt het ook nog mogelijk op elegante wijze de bufferruimten te elimineren. Het gas

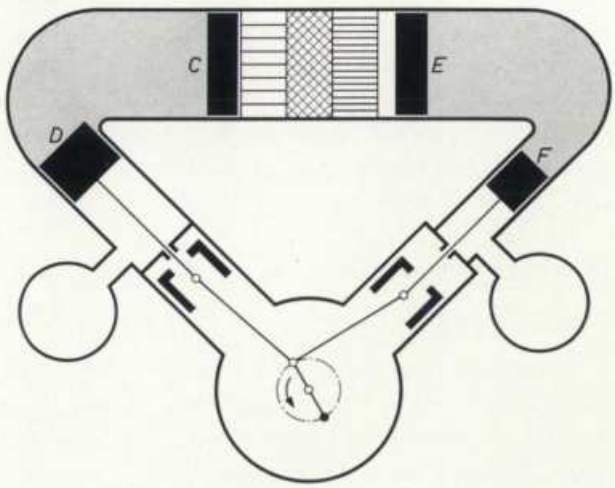


Fig. 6. Invoering van het principe van hydraulische zuigeraandrijving. De zuigers *C* en *E* zijn geplaatst als in fig. 4 en worden gedreven door de plunjers *D* en *F* via oliekolommen. Voor de aandrijving van de plunjers dient hier een opstelling identiek met die van fig. 5*b*.
De compressiezuiger *C* dient voor optimale werking in het algemeen een grotere slag te maken dan de expansiezuiger *E*. Bij gelijke slag van de plunjers wordt dit op eenvoudige wijze gerealiseerd door de compressieplunjer *D* een iets grotere diameter te geven dan de expansieplunjer *F*.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in deze ruimten heeft tot taak, een tegendruk op de onderkant van de plunjers D en F te leveren, ten einde het drijfwerk zoveel mogelijk te ontlasten. Een dergelijke tegendruk kan men nu echter ook laten leveren door het werkgas van een *tweede procescilinder*, die met een fazeverschil van 180° ten opzichte van de eerste werkt. We komen dan tot een opstelling als geschetst in *fig. 7*.

De laatste stap dient ter opheffing van een schoonheidsfout die nog aan de opstelling volgens fig. 7 kleeft. Men heeft in die opstelling twee procescilinders, waarvan de vier zuigers worden gedreven door een drijfwerk met twee *dubbelwerkende plunjers*, die dus ieder aan boven- èn onderkant een oliekolom in beweging brengen. Door nagaan van de fazebetrekkingen van de variatie der verschillende volumes (zie de hulpfiguur in fig. 7) verifieert men gemakkelijk dat de beide compressiezuigers voor de twee procescilinders aan dezelfde kant moeten liggen. De plunjer D moet derhalve twee compressiezuigers drijven, terwijl de plunjer F het vermogen moet opnemen dat de twee expansiezuigers leveren. De twee armen van het V-drijfwerk zijn daardoor — zowel wat de vermogens als wat de krachten betreft — in hoge mate ongelijk belast. Wanneer b.v. het door de krukas geleverde vermogen 100 kW bedraagt, zou de arm die de compressie teweegbrengt ca. 120 kW moeten doorgeven, terwijl de arm die het expansievermogen retourneert slechts met ca. 20 kW zou zijn belast. Om dit nadeel te ondervangen, zijn we overgegaan tot de opstelling volgens *fig. 8*. De daarin geschetste machine — in principe reeds overeenkomende met onze nieuwe koelmachine — heeft niet twee, doch *vier procescilinders*. De twee zuigerstangen in de armen van het V-drijfwerk dragen nu ieder zowel een dubbelwerkende compressieplunjer als een dubbelwerkende expansieplunjer. De twee plunjers voor elke

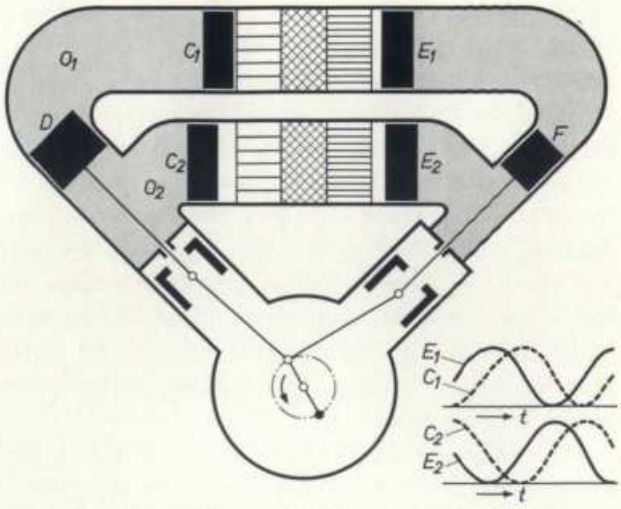


Fig. 7. Aan de opstelling van fig. 6 is een tweede procescilinder toegevoegd. De twee compressiezuigers C_1, C_2 worden gedreven door één *dubbelwerkende* plunjer D, met oliekolommen O_1, O_2 aan boven- en onderkant. Op analoge wijze worden de twee expansiezuigers E_1, E_2 gedreven. Zodoende heeft men geen bufferruimten meer nodig.

In het hulpfiguurtje zijn de verplaatsingen van de vier proceszuigers als functie van de tijd uitgezet. De compressiezuigers van beide procescilinders moeten aan dezelfde kant liggen om het juiste fazeverschil tussen de bewegingen van compressie- en expansiezuiger te krijgen; de twee procescilinders werken met een onderling fazeverschil van 180°.

arm zijn in tandemopstelling gemonteerd. Bij het genoemde nettovermogen van 100 kW is nu elk der beide armen belast met 50 kW.

De configuratie van de machine

Zoals in fig. 8 is te zien (vergelijk ook de foto fig. 2), zijn twee van de vier procescilinders aan de voorkant van de machine aangebracht en twee aan de achterkant. De twee paren zijn in tegengestelde richting hellend gemonteerd. Tot deze vorm zijn we gekomen doordat we de beide armen van de V-opstelling zoveel mogelijk

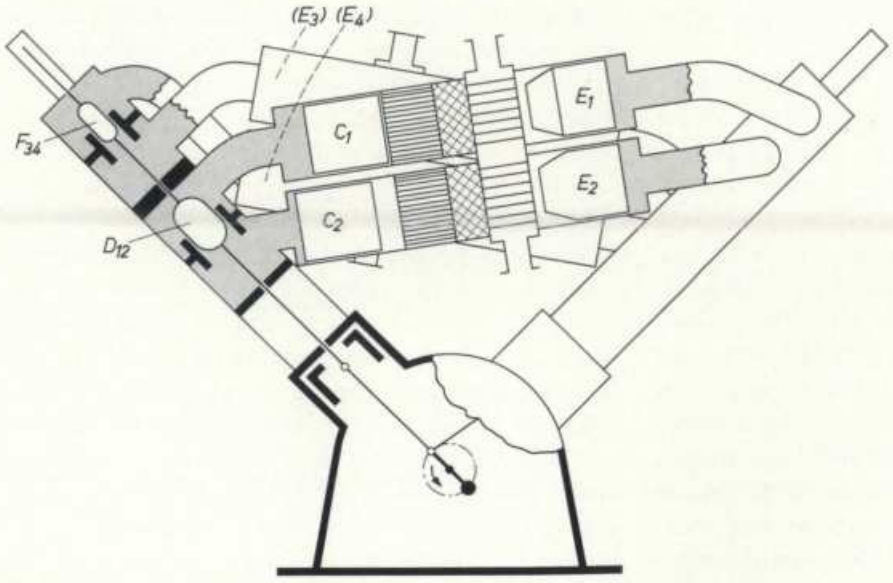


Fig. 8. Het systeem van fig. 7 is hier verdubbeld: men heeft twee procescilinders aan de voor- en twee aan de achterzijde van de machine. Elke arm van het V-drijfwerk draagt zowel een compressieplunjer (D_{12}), die twee compressiezuigers drijft (C_1 en C_2), als een expansieplunjer, die twee expansiezuigers drijft. De expansieplunjer (F_{34}) van de hier in doorsnede getekende arm drijft de twee expansiezuigers (E_3 en E_4, niet zichtbaar) van de aan de andere zijde van de machine gelegen procescilinders.

De beide armen van het V-drijfwerk zijn nu in gelijke mate belast en geheel gelijk uitgevoerd. Dit schema is gerealiseerd in de nieuwe koudgaskoelmachine (type C).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gelijk wilden houden: in elke arm is de compressieplunjer onder en de expansieplunjer boven aangebracht. De wens om de hydraulische leidingen zo kort mogelijk te houden, dus de vier compressiezuigers zo dicht mogelijk bij de compressieplunjers te plaatsen (en analoog voor de expansiezuigers), voert dan automatisch tot een hellende stand van elke procescilinder. De hellende opstelling heeft tevens het belangrijke voordeel dat het in de koudewisselaar gevormde condensaat (b.v. vloeibare lucht) snel van de pijpen afloopt. Men krijgt daardoor een geringere filmdikte op de pijpen dan bij een horizontale opstelling, en derhalve een betere koudeoverdracht.

Bij nadere beschouwing van fig. 8 zal de lezer opmerken dat de hydraulische leidingen aan de expansiezijde van de twee achterste procescilinders elkaar kruisen, terwijl dit niet zo is bij de twee voorste cilinders. Dat dit noodzakelijk is, kan men als volgt inzien. Met de in fig. 8 aangegeven draairichting van het V-drijfwerk krijgt men voor het voorste cilinderpaar (compressiezuigers links) het juiste fazeverschil tussen compressiezuiger en expansiezuiger (E 90° in faze vóór ten opzichte van C). Eo ipso zou het fazeverschil voor het achterste cilinderpaar (expansiezuigers links) zonder de kruising verkeerd zijn. Daar de bovenste en de onderste cilinder in elk paar met een fazeverschil van 180° werken, wordt door het kruisen van de leidingen aan een zijde zowel voor de bovenste als voor de onderste cilinder het juiste fazeverschil tussen compressie- en expansiezuiger hersteld.

De keuze van het toerental

Het is niet de bedoeling in dit artikel uitvoerig in te gaan op de keuze van de diverse parameters, die aan de constructie ten grondslag ligt. Slechts de keuze van het toerental moet nader worden belicht, aangezien de koersverandering, waarvan in de inleiding gewag is gemaakt, mede het gevolg is geweest van verandering van inzicht omtrent dit punt.

Gaat men ervan uit dat men in een koudgaskoelmachine, onder vastgestelde bedrijfscondities, een bepaald koelvermogen per cilinder wil verkrijgen, dan is daarmee het produkt van toerental en slagvolume voorgeschreven. Bij de wederopvatting van het 19e-eeuwse Stirling-proces door de onderzoekers in het Philipslaboratorium, nu ruim 20 jaar geleden, is het uitgangspunt geweest dat men het slagvolume en daarmede de hele machine klein en licht kon maken mits het toerental veel groter werd gekozen dan bij de ouderwetse heteluchtmotoren. De weg hiertoe werd geopend door een nieuwe conceptie van warmtewisselaars en regenerator. Uit de toen ontwikkelde theorie van het Stirling-proces was gebleken dat voor een goed rendement de drukverhouding bij de compressie niet te klein mocht worden gekozen. Dit hield in dat mèt het slagvolume ook het volume van de totale schadelijke ruimte, met warmtewisselaars enz., verkleind moest worden. Om nu ondanks een kleinere beschikbare ruimte van de warmtewisselaars hierin voldoend grote warmteoverdragende oppervlakken te krijgen, was een zeer fijne onderverdeling in kanalen nodig. Het essentiële punt in de ontwikkeling was dat hiervoor constructies werden gevonden die ondanks de corresponderende hogere toerentallen geen overmatige stromingsverliezen veroorzaakten. Zo lukte het, goed werkende machines te construeren voor een toerental van 1500 omw/min (of nog hoger). Op dit toerental waren dan ook sinds ongeveer 1950 alle Philips-Stirling-machines gebaseerd.

Voor de industriële koudgaskoelmachines was het geen wet van Meden en Perzen dat naar zo klein mogelijke afmetingen moest worden gestreefd. „Kleiner" is voor de industrie alleen gerechtvaardigd als het betekent „goedkoper" en „hoger rendement", of eventueel een voor het doel gunstiger compromis tussen deze beide wensen. Inderdaad is er sprake van een compromis, zoals globaal als volgt te beredeneren is. Gaat men uit van een snellopende kleine machine, dan is hetzelfde koelvermogen te bereiken met een langzamere en grotere machine, die dank zij het grotere slagvolume grotere schadelijke ruimten mag hebben. Voor een zelfde goede warmteoverdracht en dus een zelfde rendement kunnen de warmtewisselaars dan eenvoudiger uitgevoerd zijn (grover onderverdeeld), waardoor de grotere machine ondanks het meerdere materiaalverbruik ongeveer hetzelfde kan kosten als de kleine. Men kan nu echter de warmtewisselaars alsnog veel fijner onderverdelen en hiermee weer tot de grens van het mogelijke gaan, evenals bij de kleine machine: dan wordt de machine wel degelijk duurder, maar het rendement wordt beter dan dat van de kleine machine.

Moet men een compromis zoeken, dan zal voor een industriële machine het rendement iets zwaarder wegen dan de prijs. Bovendien gaan voor industriële toepassingen vanzelf de gedachten uit naar robuuste, eventueel vrij grote machines, met matige toerentallen, daar dit voor levensduur en mechanisch rendement gunstig is.

In het licht van deze gedachten is het probleem van de keuze van het toerental speciaal voor de industriële machine opnieuw onder de loep genomen. Er zijn optimaliseringsberekeningen met een elektronische rekenmachine uitgevoerd, waarbij met talrijke factoren rekening werd gehouden, o.a. ook met de warmtecapaciteit van de regeneratoren, die een kritiek punt in het thermodynamische gedrag van deze machines vormt. Het resultaat was, dat men voor grotere koudgaskoelmachines inderdaad met voordeel een wat lager toerental kan kiezen dan voor de kleine. Op grond hier-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van zijn wij voor de nieuwe machine teruggegaan tot een toerental van ca. 600 omw/min. Dit is overigens ook het gebruikelijke toerental voor compressoren met overeenkomstig asvermogen, zodat wij ons voor de fabricage van de machine konden baseren op een V-drijfwerk van een normaal in de handel verkrijgbaar type.

We zullen nu de voornaamste elementen van de machine nader bespreken.

Uitvoering van de machine

Het hydraulische systeem

De oliekolom, opgesloten tussen elke zuiger van de procescilinders en de bijbehorende plunjer van het V-drijfwerk, kan men opvatten als een stang die zich in iedere gewenste bocht laat buigen. Zulk een „vloeibare stang" heeft, behalve de vrijheid in het arrangement der onderdelen, die hij aan de constructeur geeft, ook verder voortreffelijke eigenschappen. Men kan er vrijwel zonder verliezen en zonder slijtage grote krachten mee overbrengen: de hydraulische verliezen (stromings-, lek- en wrijvingsverliezen) kunnen tot ca. 5% van het asvermogen worden beperkt. Men heeft geen uitlijningsproblemen. De overbrengingsverhouding (d.i. de verhouding tussen de slag van de plunjer en die van de zuiger) kan de constructeur binnen wijde grenzen variëren door geschikte keuze van de diameters van plunjer en zuiger.

Uiteraard vereist de vloeibare stang enige verzorging: men moet, evenals bij alle hydraulische systemen, maatregelen nemen voor filtrering, koeling en ontluchting van de olie. Afgezien hiervan brengt de vloeibare stang slechts één essentieel probleem mee: de afdichting tussen de oliekolom en de gasruimte van de procescilinder. Het is uiterst belangrijk dat de procesruimte volkomen schoon (olievrij) blijft, terwijl anderzijds het naar buiten lekken van gas zeer schadelijk voor het rendement (en ook om andere redenen ongewenst) is.

Het was een gelukkige coïncidentie dat tijdens de eerste ontwikkelingswerkzaamheden aan het hydraulische systeem — waarbij het afdichtingsprobleem het meeste hoofdbrekens veroorzaakte — in het Natuurkundig Laboratorium een nieuw soort *hermetische afdichting* werd ontwikkeld, die een afdoende oplossing voor het probleem bleek te bieden. Deze afdichting, het rolmembraan met vloeistofkussen, is in een afzonderlijk artikel in dit nummer beschreven [3]. De eisen waaraan voldaan moet worden voor een goede werking van het rolmembraan, bleken wonderwel te harmoniëren met de eisen gesteld voor de hydraulische zuigeraandrijving. We willen dit toelichten en het afdichtingssysteem tevens nader beschrijven. Voor meer details betreffende het principe en diverse uitvoeringsvormen van de rolmembraanafdichting zij verwezen naar het aangehaalde artikel [3].

De afdichting met rolmembranen

De rolmembraanafdichting is in *fig. 9* schematisch afgebeeld. Het rolmembraan, dat van een speciale polyurethaanrubber (zonder wapening) wordt gemaakt, is enerzijds bevestigd aan de cilinderwand, anderzijds aan de zuigerwand, en het rolt afwisselend

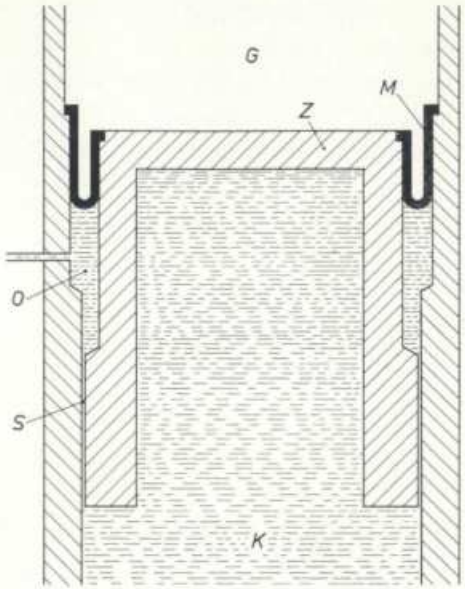


Fig. 9. De gasruimte G van een procescilinder is hermetisch afgedicht tegen de oliekolom K aan de andere kant van elke zuiger Z door een rolmembraan M (zie het aangehaalde artikel [3]). Dit membraan wordt ondersteund door een oliekussen O, waarbij een constant drukverschil tussen O en G dient te worden gehandhaafd.

op deze beide wanden af. De gasruimte is hierdoor hermetisch afgesloten. Het membraan wordt door de gasdruk boven de zuiger op een ringvormig oliekussen gedrukt, waarin een enkele atmosferen lagere druk heerst. Het oliekussen wordt afgedicht door een nauwe spleet (S) tussen zuiger en cilinderwand.

Voor de levensduur van het rolmembraan is het essentieel dat dit tijdens het op- en afrollen een constante lengte houdt; dit komt op hetzelfde neer als het handhaven van een constante rek, dus het handhaven van een constant drukverschil over het membraan. Hieraan wordt voldaan indien men ervoor zorgt dat het *volume* van het oliekussen tijdens de slag niet varieert. Dit wordt verwezenlijkt door de in fig. 9 geschetste configuratie van de vloeistofruimte (trapjesconstructie, zie het aangehaalde artikel [3], blz. 348).

---

[2] Zie het tweede in [1] aangehaalde artikel.

[3] J. A. Rietdijk, H. C. J. van Beukering, H. H. M. van der Aa en R. J. Meijer, Een hermetische stang- en zuigerafdichting voor grote drukverschillen, Philips techn. T. **26**, 345-354, 1964/65 (no. 11/12).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Over een langere tijd dan één slag bekeken, zou de membraanspanning alsnog kunnen variëren, doordat de hoeveelheid olie in het vloeistofkussen niet constant blijft als er olie via de afdichtingsspleet in- of uittreedt. Daarom vereist de rolmembraanafdichting altijd ook een regelsysteem, dat door regeling van de oliehoeveelheid rechtstreeks voor een constant drukverschil tussen het oliekussen en de gasruimte zorgt.

Het oliekussen moet zoveel mogelijk op kamertemperatuur worden gehouden, aangezien de voortreffelijke eigenschappen van de polyurethaanrubber bij hoge temperatuur teloorgaan. Bovendien mag de olie geen gas bevatten (het kussen zou dan zijn stijfheid verliezen), en aangezien altijd enig gas uit de procesruimte door het membraan zal diffunderen, is geregelde doorspoeling nodig. Andere schadelijke verontreinigingen in het oliekussen moeten door filtreren van de olie worden verre gehouden.

De eisen van koeling, doorspoeling en filtrering van de olie, die de rolmembraanafdichting stelt, zijn we al tegengekomen: het zijn dezelfde eisen waaraan ook voor het hydraulische systeem zelf moet worden voldaan.

Het besluit om de constructie van de nieuwe koelmachine te baseren op de toepassing van rolmembranen, is vanzelfsprekend pas genomen nadat volledige zekerheid was verkregen dat met deze membranen een voldoend lange levensduur kan worden bereikt — een mogelijkheid waartegenover velen aanvankelijk sceptisch stonden. Bij de duurproeven in het Natuurkundig Laboratorium werden bij een doelmatige keuze van de afmetingen van de afdichting levensduren van meer dan 10 000 uur bereikt, met een toerental van 1500 omw/min. Daar onze machine met slechts 600 omw/min loopt, mogen wij gevoeglijk nog langere levensduren verwachten. Daar komt nog bij dat wij de gemiddelde diameter van het rolmembraan relatief groot konden maken (175 mm), hetgeen gunstig is voor de levensduur, en dat we voor het boven vermelde regelsysteem in ons speciale geval een bijzonder eenvoudige en efficiënte uitvoering konden kiezen. Hierop zullen wij straks nader ingaan.

Het prototype van de nieuwe koelmachine is zeer uitvoerig beproefd en de resultaten hebben ons vertrouwen in het rolmembraan gerechtvaardigd. In een duurproef van meer dan 4000 uur bij volle belasting heeft geen enkel membraan het begeven; bij daaropvolgende demontage van de machine bleken de rolmembranen nauwelijks enige slijtage of andere tekenen van ouderdom te vertonen. Dit gunstige beeld toonden trouwens alle delen van de machine.

De levensduur van een membraan is natuurlijk niet onbeperkt. De machine is echter op zodanige wijze geconstrueerd dat het vervangen van een lek membraan nauwelijks meer tijd behoeft te vergen dan het verwisselen van een lekke band. Om ook zulke korte onderbrekingen van het bedrijf zoveel mogelijk te vermijden, wordt aanbevolen, alle membranen eens per jaar bij een grote onderhoudsbeurt te vervangen.

Nadere beschouwing van de combinatie van hydraulisch systeem en rolmembraan

In *fig. 10* is voor een enkele proceszuiger het in de machine toegepaste hydraulische systeem in vereenvoudigde vorm weergegeven. De zuiger Z wordt hydraulisch gedreven door de (dubbelwerkende) plunjer D via de oliekolom K. Aan de zijde van de oliekolom is de zuiger hol uitgevoerd. Het rolmembraan M, dat de gasruimte G hermetisch afdicht, wordt ondersteund door het ringvormige oliekussen O, dat zelf afgedicht is tegen de oliekolom door de cilindrische spleet S. Deze spleet en de tweede cilindrische spleet T vormen de geleiding van de zuiger.

De slag van de zuiger wordt bepaald door het slagvolume van de plunjer. De lengte van de „vloeibare stang" via welke de plunjer de zuiger drijft, is echter niet vanzelf constant. Op diverse plaatsen treden onvermijdelijke lekstromen in het hydraulische systeem op, en bovendien is er de noodzaak van een regelmatige doorstroming van verse, gefiltreerde olie, waarop we reeds hebben gewezen. Er is dus een voorziening nodig om de lengte van de stang alias oliekolom op de juiste waarde te regelen. Hiertoe dienen de openingen i en u in de geleiding T. Is de oliekolom te kort, dan komt in de *buitenste* stand van de zuiger de opening i vrij. De pomp P heeft dan de gelegenheid een hoeveelheid olie uit het reservoir *Res* aan de kolom toe te voegen. Is er te veel olie toegevoegd, dan komt in de *binnenste* stand van de zuiger de opening u vrij. Het teveel aan olie kan hierdoor weer naar het reservoir ontsnappen. Deze eenvoudige regeling van de kolomlengte werkt in de praktijk voortreffelijk — behalve natuurlijk bij stilstaande machine. Hierop komen we nog terug.

Zoals reeds is opgemerkt, moet het rolmembraan met een constante rek door het gas op het oliekussen worden gedrukt, en om dit te bereiken, is een regelsysteem nodig dat het drukverschil tussen oliekussen en gasruimte constant houdt. Het gewenste drukverschil bedraagt ca. 4 atm. In het aangehaalde artikel [3] is een eenvoudig regelsysteem beschreven (zie fig. 5 aldaar), waarbij een pompje olie aan het kussen suppleert, terwijl een klepje in de pompleiding wordt bestuurd door een veerbelast membraan dat aan de ene zijde de druk van het gas voelt, aan de andere zijde de druk van het oliekussen. In ons geval is een analoog regelsysteem toegepast, maar het was daarbij niet nodig de regelklep op enigerlei wijze met de gasruimte van het Stirlingproces in verbinding te brengen. Immers, de momentele

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

oliedruk in de kolom binnen de zuiger is vrijwel gelijk aan de gasdruk aan de andere kant van de zuiger (er is slechts een klein verschil ten gevolge van de wrijving en de massakracht van de zuiger). We laten derhalve de regelklep niet de gasdruk, maar de druk van de oliekolom voelen. Het regelapparaatje *R* is daartoe uitgevoerd en aangesloten op de wijze die men in fig. 10 ziet. In plaats van een membraan bevat het apparaat een veerbelast plunjertje *H*. De veerkracht is zo ingesteld dat het plunjertje de poort *p* zal openen zodra de druk in het oliekussen stijgt boven de gewenste waarde, in dit geval 4 atm beneden de druk in de oliekolom. Dan kan de olie naar het reeds genoemde reservoir *Res* ontsnappen, en de druk in het kussen daalt. Wordt hij nu lager dan de genoemde waarde, dan sluit het plunjertje de poort *p*, en de druk in het kussen stijgt weer, doordat van de op hogere druk staande oliekolom continu olie naar het kussen lekt via de spleet *S*.

Dit voortdurende lekverlies uit de oliekolom wordt hieraan gesuppleerd door het andere, reeds beschreven, regelsysteem dat de kolomlengte constant houdt. Op deze wijze wordt dus de olie zowel in het hydraulische systeem als in de ondersteuning van het rolmembraan voortdurend ververst, waarbij hij tevens kan worden gekoeld, gefiltreerd en ontgast. Hydraulische aandrijving en rolmembraanafdichting vormen inderdaad een voortreffelijk geïntegreerd geheel.

De elektrisch gedreven oliepomp *P* laat men steeds lopen, ook als de machine tijdelijk wordt stopgezet. De regeling van de kolomlengte werkt dan echter niet, en na stopzetten van de machine begint dus olie uit elke kolom weg te lekken. De acht zuigers gaan dan geleidelijk naar hun „buitenste" stand (d.i. de stand waarbij de inlaatopening *i* in de geleiding *T* vrijkomt, want dan gaat de pomp weer olie suppleren). De oliekolommen nemen derhalve tijdens stilstand van de machine alle een verkeerde lengte aan. Dit is voor het weer-aan-de-gang-brengen van de machine in het geheel geen bezwaar — hoe verrassend dit misschien ook klinkt: reeds met enkele slagen brengt de regeling voor elke zuiger de oliekolom op de juiste lengte. Alleen is het wel duidelijk dat in deze omstandigheden geen plotselinge start van de machine geoorloofd is, daar de zuigers dan met kracht tegen hun aanslagen zouden oplopen. Het aan-de-gang-brengen geschiedt derhalve als volgt. Op de as van de elektromotor, die de machine drijft, is een zwengel aangebracht, waarmee men de machine langzaam tornt. Tijdens de eerste draaiing voelt men duidelijk de zuigers tegen hun aanslagen lopen; reeds bij de volgende omwenteling lopen ze

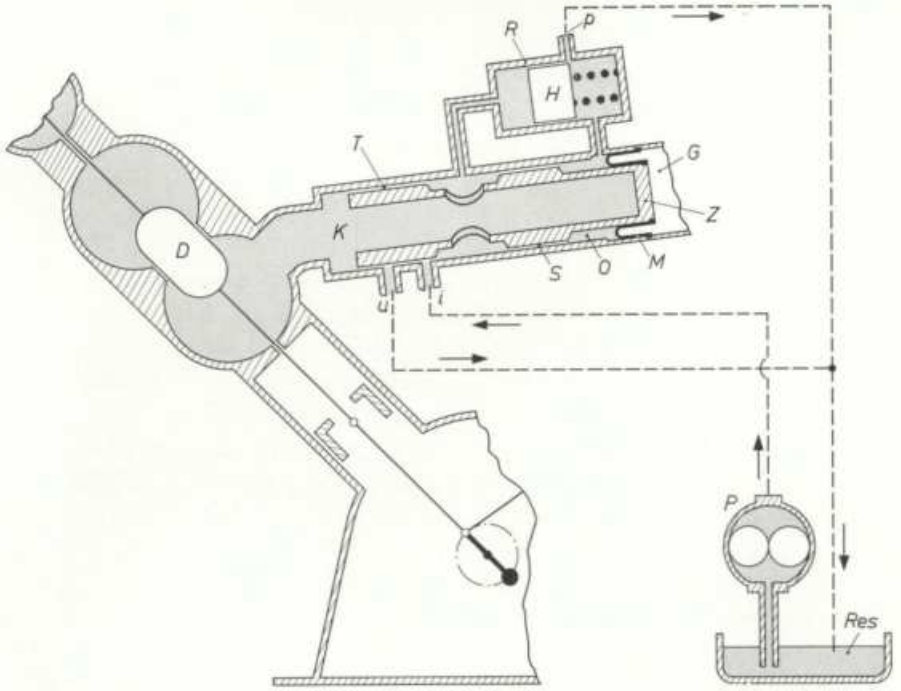


Fig. 10. Regelsystemen voor de hydraulische aandrijving van elke proceszuiger *Z* en voor de vloeistofondersteuning van het bijbehorende rolmembraan *M*. *P* oliepomp. *Res* oliereservoir. Door toevoer of afvoer van olie via resp. de openingen *i* en *u* wordt de „lengte" van de oliekolom *K* constant gehouden. Aan het oliekussen *O* wordt continu olie toegevoerd via de afdichtingsspleet *S*; het veerbelaste plunjertje *H* regelt de afvoer via de poort *p* zodanig dat het drukverschil over het rolmembraan constant blijft.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

geheel vrij. De elektrische schakeling is zodanig uitgevoerd dat eerst dan de aandrijfmotor kan worden gestart. Een andere beveiliging zorgt ervoor dat het starten pas kan gebeuren als de procescilinders met gas tot een zekere druk zijn gevuld, zodat de rolmembranen de juiste spanning krijgen. Tevens is dan gewaarborgd dat de oliekolommen tijdens de hele slag op druk belast blijven (bij belasting op trek zou er cavitatie in de olie optreden, de „vloeibare stang" zou „breken").

Komen door de een of andere oorzaak, b.v. een storing in het elektriciteitsnet, de machine èn ook de oliepomp tot staan, dan treedt een beveiliging in werking die ervoor zorgt dat automatisch het gas uit de vier procescilinders wordt afgeblazen. Zonder deze maatregel zouden in het genoemde geval de acht zuigers niet alleen tot de boven omschreven „buitenste" stand maar nog verder wegzakken, en de rolmembranen zouden dan door de gasdruk (gemiddeld 30 atm) vernield kunnen worden.

Door het ongewone van de gehele constructie heeft bij het begin van de ontwikkeling over allerlei punten onzekerheid geheerst. Met name moest rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat de stromingsverliezen in de snel heen en weer bewegende oliekolommen wel eens vele malen groter konden zijn dan de verliezen in een stationaire stroming (gelijkstroom) van overeenkomstige snelheid. Bruikbare ervaring op dit punt stond niet ter beschikking, ook niet in de ons bekende literatuur. Gelukkig bleken deze verliezen mee te vallen: door metingen aan de machine met uitgeschakeld thermisch gedeelte hebben wij kunnen vaststellen dat de totale stromingsverliezen niet meer bedragen dan ca. 2 kW (bij een totaal asvermogen van 134 kW), hetgeen nauwelijks meer is dan bij een stationaire stroming van de olie zou zijn te verwachten. Verdere resultaten van de gedane metingen vindt men in het laatste hoofdstuk.

De warmtewisselaars

Het arrangement van de warmtewisselaars in elke procescilinder van de nieuwe machine is in *fig. 11a* nog eens afzonderlijk geschetst (twee-zuigerarrangement; in principe hetzelfde als in fig. 4, waarvan we immers zijn uitgegaan).

De koersverandering waarover in de inleiding is gesproken, hield in dat tot een constructie met dit arrangement werd overgegaan, en dat werd afgestapt — althans voor de grote industriële machine — van het arrangement met een *verdringer*, dat tot dusver in alle Philips koudgaskoelmachines was toegepast. De argumentatie op dit belangrijke punt behoeft nog enige toelichting.

De door Philips toegepaste verdringeropstelling is in fig. 11*b* weergegeven. De verdringer *H* heeft uitsluitend tot taak, het gas via de warmtewisselaars van de compressieruimte V_C naar de expansieruimte V_E en vice versa te verplaatsen. Over de verdringer staat derhalve steeds slechts een zeer klein drukverschil, alleen veroorzaakt door de stromingsweerstand van het gas. Gezien het feit dat weglekken van het afgekoelde gas uit de *expansieruimte* bijzonder schadelijk is voor de koudeproduktie en het rendement van de machine, moet aan de bewegende afdichting van deze ruimte bijzondere aandacht worden besteed. Met de vroeger beschikbare, feitelijk gebrekkige, afdichtingen („lekbeperkers" worden ze in het aangehaalde artikel [3] genoemd) was het minder bezwaarlijk de slechts aan een gering drukverschil blootgestelde verdringer van fig. 11*b* van de nodige afdichting te moeten voorzien, dan dit te moeten doen voor de expansiezuiger *E* van fig. 11*a*, waarover een voortdurend met grote amplitude wisselend drukverschil staat. Dit was het gezichtspunt dat tot dusver bij de keuze de doorslag gaf.

Door de volledige overwinning van het afdichtingsprobleem met behulp van het rolmembraan komt het twee-zuigerarrangement van fig. 11*a*, althans voor grote machines, weer in het voordeel ten opzichte van het arrangement met verdringer volgens fig. 11*b*. Immers, thermodynamisch is het eerstgenoemde arrangement, door de volkomen gelijkmatige verdeling van het stromende gas over de doorsnede van de warmtewisselaars nog gunstiger dan de ringvormige opstelling in fig. 11*b*. Bovendien kunnen allerlei spannings-

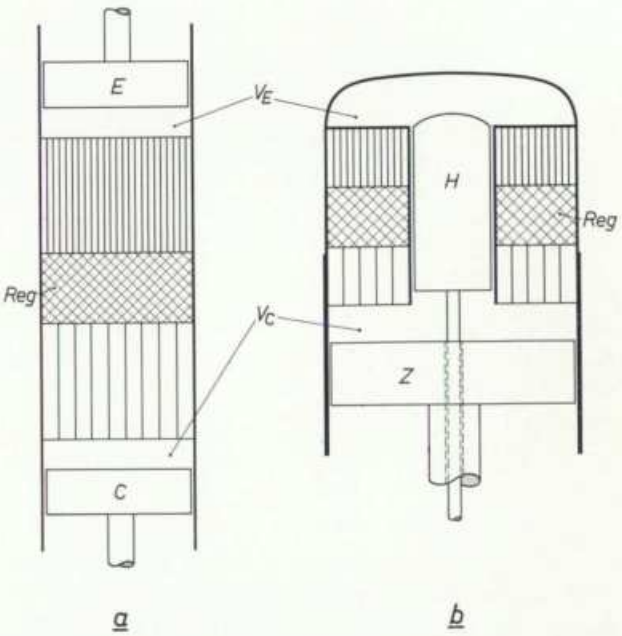


Fig. 11. Vergelijking van het arrangement der warmtewisselaars in de nieuwe machine (*a*) en in een machine met verdringer (*b*). In deze laatste is *Z* de zuiger, *H* de verdringer. In beide machines is V_C de compressieruimte, V_E de expansieruimte.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

problemen in de buitenwanden daarbij gemakkelijker worden opgelost.

We geven hier nog enkele bijzonderheden over de warmtewisselaars; deze zijn goed te zien in *fig. 12*, waarin de machine in zijn geheel vereenvoudigd is weergegeven.

De *koeler* bestaat in hoofdzaak uit twee pijpenplaten met koperen pijpen en een koelwatermantel. Het gas stroomt door de pijpen, het koelwater eromheen. De pijpen zijn volgens een zodanig patroon in de pijpenplaten aangebracht dat het gas bij het uitstromen een zo gelijkmatig mogelijke stroming in de regenerator veroorzaakt. Ter verbetering van de warmteoverdracht wordt de koelwaterstroom geleid door coaxiale cilindrische schotten die tussen de pijpen zijn aangebracht, met een tussenschot. De koelers van twee, in de machine boven elkaar gelegen, procescilinders worden in serie door het koelwater doorstroomd.

De *regenerator* bestaat uit een aantal schijven van gesinterd kopergaas, opgesloten in een dunwandige cilinder van 18/8 chroomnikkelstaal. Het materiaal in het gaas is zeer gelijkmatig verdeeld, de spleet tussen gaas en cilinder is zo klein mogelijk gemaakt, en de kopvlakken van de regenerator zijn zo uitgevoerd dat een gelijkmatige overgang van de regeneratorstroming naar de pijpen van de koeler en van de koudewisselaar zoveel mogelijk wordt bevorderd.

De *koudewisselaar* is eveneens opgebouwd uit pijpenplaten, koperen pijpen en mantel, met twee geperforeerde tussenschotten, en het gas stroomt door de pijpen, terwijl de nuttige koude aan de buitenzijde van de pijpen wordt afgestaan. De mantel is aan weerszijden hardgesoldeerd aan een cilinder van 18/8 chroomnikkelstaal, nl. enerzijds aan de cilinder van de regenerator, anderzijds aan de cilinder waarin de dop van de expansiezuiger — gemaakt van hetzelfde staal — heen en weer gaat. Deze stalen delen vormen de warmteweerstanden die geleiding van kostbare koude van de koudewisselaar naar de warme delen van de machine moeten tegengaan.

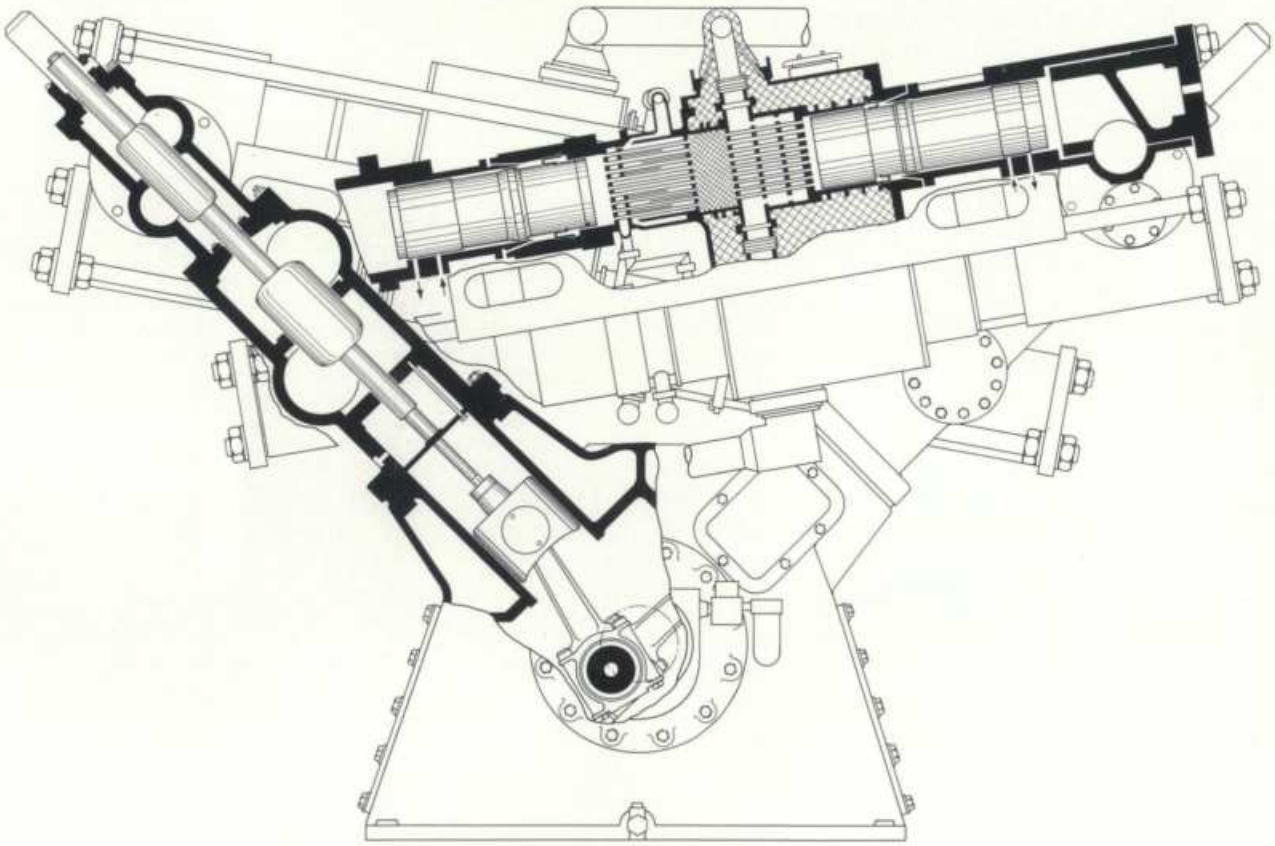


Fig. 12. Doorsnede van de gehele machine, met enkele details van de constructie van de procescilinders, de warmtewisselaars enz. Men ziet de trekankers die de deksels aan rechter- en linkerzijde van elke procescilinder met elkaar verbinden.

De koudewisselaars zijn in de eerste plaats geconstrueerd voor toepassingen zoals het condenseren van gassen (methaan, zuurstof, lucht, stikstof, enz.). Condensatie is mogelijk bij een druk tot 30 atm. De koudewisselaars van twee boven elkaar liggende procescilinders zijn in serie geschakeld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Verdere bijzonderheden van de constructie

In fig. 12 ziet men hoe de procescilinders zijn bevestigd. De warmtewisselaars worden in hoofdzaak ondersteund door de gemeenschappelijke isolatiemantel die telkens twee boven elkaar gelegen koudewisselaars omhult. Het geheel van warmtewisselaars met compressiecilinder en expansiecilinder vormt één lange holle cilinder met nagenoeg constante binnendiameter. Hierdoor kunnen noch door de gasdruk noch door uitzetting of montagefouten grote axiale krachten in de warmtewisselaars optreden. De lange cilinder is aan elk einde afgesloten door een deksel, waarop natuurlijk wèl axiale krachten werken. Daar de krachten op de beide deksels echter nagenoeg even groot en tegengesteld gericht zijn, kunnen ze worden opgevangen door twee trekankers, die de beide deksels verbinden. De cilinder blijft vrij van axiale krachten doordat het bovenste deksel met een spleetafdichting axiaal beweegbaar ten opzichte van de cilinder is uitgevoerd. De hierdoor weglekkende olie wordt naar het algemene reservoir (*Res* in fig. 10) gevoerd en door de oliepomp op de reeds beschreven wijze weer aan alle oliekolommen gesuppleerd.

Het freem van het *drijfwerk* met krukas en kruishoofden is een normaal compressorfreem, dat wij van een gespecialiseerde fabriek betrekken. De éénkrukskrukas is in drie rollagers gelagerd; buiten het derde lager is de rotor van de aangeflensde elektromotor op de as bevestigd (vliegende lagering). Ook de elektromotor is van een normaal in de handel verkrijgbaar type. Het geheel heeft door deze constructie bijzonder geringe mechanische verliezen en neemt zeer weinig vloerruimte in beslag.

Op het freem zijn de beide in V-vorm staande pompcilinders met de dubbelwerkende plunjers gemonteerd. We hebben reeds gewezen op de geringe stromingsverliezen. Door afzonderlijke metingen is bevestigd dat de plunjerconstructie (d.i. dus de plunjer met korte afdichting in een wijd kanaal) in dit opzicht een gunstiger oplossing biedt dan de constructie met een normale zuiger in een cilinder.

De machine is geconstrueerd voor een hoogste toelaatbare maximumdruk van 60 atm en een hoogste toelaatbaar asvermogen van 134 kW.

Meetresultaten

Bij de beproeving van het prototype zijn uitvoerige metingen gedaan van het koelvermogen onder verschillende omstandigheden, met name bij verschillende temperatuur aan de koude zijde. Voor een koelwatertemperatuur van 15 °C en een koelwaterstroom van 20 m³/h zijn de meetresultaten bij maximale belasting in de grafieken *fig. 13* en *14* weergegeven: fig. 13 geldt voor waterstof en fig. 14 voor helium als

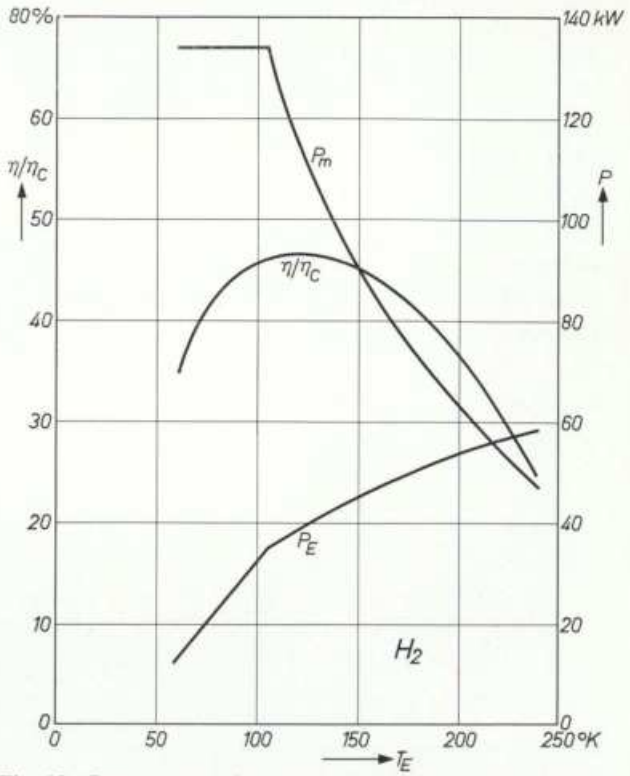


Fig. 13. Gemeten waarden van koelvermogen P_E en asvermogen P_m, en hieruit berekende waarden van het relatieve rendement η/η_C van de nieuwe koudgaskoelmachine, als functie van de temperatuur T_E aan de koude zijde, voor een koelwatertemperatuur van 15 °C en een koelwaterstroom van 20 m³/h, bij gebruik van *waterstof* als werkgas. De machine was bij de metingen maximaal belast: bij temperaturen boven 110 °K had de maximumdruk de hoogste toelaatbare waarde (60 atm), en hierdoor werd het asvermogen beperkt; bij lagere temperatuur werd gewerkt met lagere drukken om het hoogste toelaatbare asvermogen (134 kW) niet te overschrijden.

werkmedium. Uitgezet is het opgenomen asvermogen P_m — dat pas bij daling van de temperatuur aan de koude zijde tot 110 °K zijn maximale waarde van 134 kW bereikt —, het geleverde koelvermogen P_E, en het hieruit berekende rendement η, betrokken op het maximale theoretisch mogelijke rendement η_C bij de desbetreffende temperatuur (Carnot-rendement). Men ziet dat het rendement buitengewoon hoge waarden

Tabel I. Rendement η/η_C van de nieuwe koudgaskoelmachine (type C) en van de machine type B, beide werkend bij maximale belasting op een temperatuur van 77 °K, bij een koelwatertemperatuur van 15 °C.

	werkgas He	werkgas H_2
Machine B	27,6%	29,4%
Nieuwe machine (C)	41,6%	41,4% [*]

[*] Dat helium hier in machine C een hoger rendement levert dan waterstof, is daaraan te danken dat de afwijkingen ten opzichte van het gedrag van een ideaal gas bij een temperatuur van 77 °K voor helium geringer zijn dan voor waterstof. In machine B wordt het effect hiervan teniet gedaan doordat in deze (minder goed geoptimaliseerde) machine de stromingsverliezen voor helium groter zijn dan voor waterstof. — Bij hogere temperatuur, b.v. 90 °K (vloeibare zuurstof) is het genoemde voordeel van helium in machine C nog niet merkbaar; daar bereikt men, zoals men uit fig. 13 en 14 afleest, met helium een rendement van 42,0%, met waterstof echter 44,2%.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

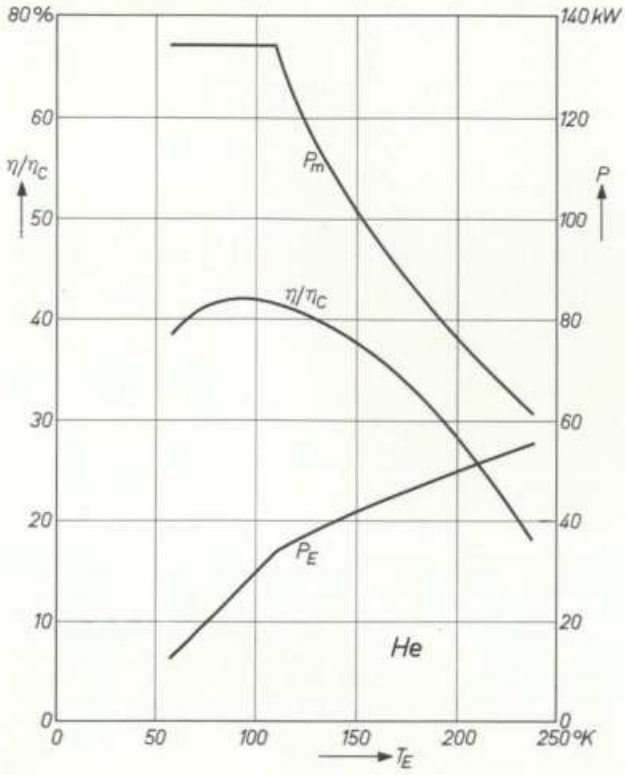


Fig. 14. Hetzelfde als fig. 13, bij gebruik van *helium* als werkgas.

bereikt. In *tabel I* is de nieuwe machine vergeleken met onze tot dusver vervaardigde viercilindermachine, type B, wat betreft het rendement bij 77 °K (vloeibare stikstof), bij gebruik van He of van H_2 als medium. De verbetering bedraagt in beide gevallen ruim 30%.

Aan het eind van de eerder genoemde duurproef van 4000 uur werd een aantal van de metingen herhaald. Het koelvermogen en het rendement hadden dezelfde waarden als aan het begin.

De vlotte ontwikkeling van de beschreven machine, die binnen 3 jaar produktierijp kon worden gemaakt, is mogelijk geweest door de inspanning van een groep enthousiaste medewerkers. Zij kunnen hier niet allen worden genoemd, maar de belangrijke bijdrage van ir. H. J. Verbeek dient zeker afzonderlijk te worden vermeld.

Samenvatting. Bij een koelmachine voor de industrie worden nog hogere eisen gesteld aan rendement, betrouwbaarheid en goedkoop onderhoud dan bij koelmachines voor laboratoria. Bovendien wenst men daar grotere capaciteiten per eenheid. Aan de Philips koudgaskoelmachines typen A en B, die in talrijke laboratoria in gebruik zijn, is daarom een grotere machine toegevoegd, type C. Deze is ontworpen volgens geheel nieuwe ideeën op constructief gebied. Om de thermodynamisch gunstigste opstelling van de procesruimten mogelijk te maken, zonder daarbij in een ingewikkeld stangenstelsel voor de zuigeraandrijving te vervallen, is gebruik gemaakt van een *hydraulische* aandrijving: de proceszuigers worden bewogen door oliekolommen, die op hun beurt in beweging worden gebracht door plunjers verbonden aan een kruishoofd-V-drijfwerk van een normaal type. De machine loopt met een toerental van ca. 600 omw/min; dit is aanzienlijk langzamer dan de kleinere types, die op een toerental van ca. 1500 omw/min gebaseerd zijn. De afdichting tussen de gasruimte en de oliekolommen is uitgevoerd met *rolmembranen*. Rolmembranen en hydraulische aandrijving blijken uitstekend bij elkaar te passen. Eenvoudige regelsystemen zorgen voor een constante lengte van de oliekolommen en een constant drukverschil over de rolmembranen. De machine is uitgerust met vier procescilinders; de acht proceszuigers worden door vier dubbelwerkende plunjers gedreven; daardoor zijn geen bufferruimten voor het compenseren van de gemiddelde druk in de gasruimten nodig. Het koelvermogen van de nieuwe machine bij 77 °K (koelwatertemperatuur 15 °C) bedraagt 20 kW, bij een asvermogen van 134 kW. Het relatieve rendement (betrokken op het Carnot-rendement) is daarbij meer dan 41%, tegenover een rendement van ca. 30% van de machine type B. Bij levensduurproeven was na 4000 uur continu bedrijf nog generlei zichtbare slijtage aan rolmembranen of andere delen vast te stellen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een mortier van siliciumcarbide

W. F. Knippenberg, G. Verspui en J. Visser

542.222

Voor de chemische analyse van een in vaste vorm gegeven preparaat is het veelal nodig, dit eerst in een mortier te verpoederen — hetzij met het oog op een snelle „ontsluiting" als men een natte analyse wil uitvoeren, hetzij om bepaalde spectrale analyses mogelijk te maken.

Het maakt hierbij verschil of men betrekkelijk grote hoeveelheden wil analyseren dan wel slechts „sporen" wil bepalen. Want bij een onderzoek naar sporen is de kans op verontreiniging door het mortier heel dikwijls een reden om het poederen achterwege te laten, en zo men toch tot poederen overgaat, omdat de eerdergenoemde redenen zwaarder wegen, dient de keuze van het mortier met bijzondere zorg te gebeuren.

De analytisch chemicus kan voor het poederen van een stof keus maken uit mortieren van porselein, van agaat en van diverse metaalcarbiden [1]. Voor het aantonen van sporen is dit soort mortieren in het algemeen onvoldoende hard en slijtvast. De niet zo lang geleden ter beschikking gekomen mortieren van aluminiumoxide en van boriumcarbide — welke materialen men tot bijna theoretische dichtheid heeft weten te sinteren — zijn in dit opzicht een grote verbetering, en ze zijn voor de sporenanalyse dan ook vrijwel onmisbaar geworden [2].

Voor het poederen van zeer harde materialen voldoen echter ook deze mortieren niet geheel; er wordt dan toch nog te veel materiaal van het mortier afgeslepen om bepaalde sporenanalyses met succes te kunnen uitvoeren.

Bij onderzoekingen in dit laboratorium aan siliciumcarbide, een vanouds bekend hard materiaal (carborundum), zijn wij erin geslaagd een mortier van dit materiaal te maken. Dit mortier is aanvankelijk vooral belangrijk voor onze eigen onderzoekingen geweest [3]. Het is immers een ideale situatie om voor het fijnmaken van een stof een mortier van hetzelfde (zuivere) materiaal te kunnen gebruiken — een principe dat men graag algemeen zou toepassen, wat echter voor de meeste stoffen wel een utopie zal blijven, wegens de hieraan verbonden technologische moeilijkheden.

Later is geconstateerd dat dit SiC-mortier ook voor algemene analytische doeleinden, buiten het SiC-onderzoek, zeer gunstige eigenschappen heeft. Siliciumcarbide is niet alleen hard en slijtvast, maar ook chemisch resistent, en bovendien is het ons gelukt het in een zeer zuivere vorm te krijgen. Voor de natte analyses telt vooral de chemische resistentie: het weinige SiC dat wordt afgeslepen, zal nl. dientengevolge niet storend werken. Voor de spectrale analyses is het meer de grote zuiverheid van het SiC-materiaal die dit mortier goed bruikbaar maakt. Alleen het silicium (en een heel enkele keer de koolstof) treedt dan als storing bij deze analyses op. (Aangezien de te onderzoeken stof bij spectrale analyses gewoonlijk tussen twee elektrodes van kool verdampt wordt, is de koolstof van het mortier zelden een factor van betekenis; storend is deze alleen indien andere materialen voor de elektrodes gebruikt worden.) Vermeldenswaard is ook dat het mortier van siliciumcarbide, chemisch resistent als het materiaal is, zeer grondig schoongemaakt kan worden. Contaminatie door achtergebleven stoffen van een voorgaande analyse zal dus veelal voorkomen kunnen worden.

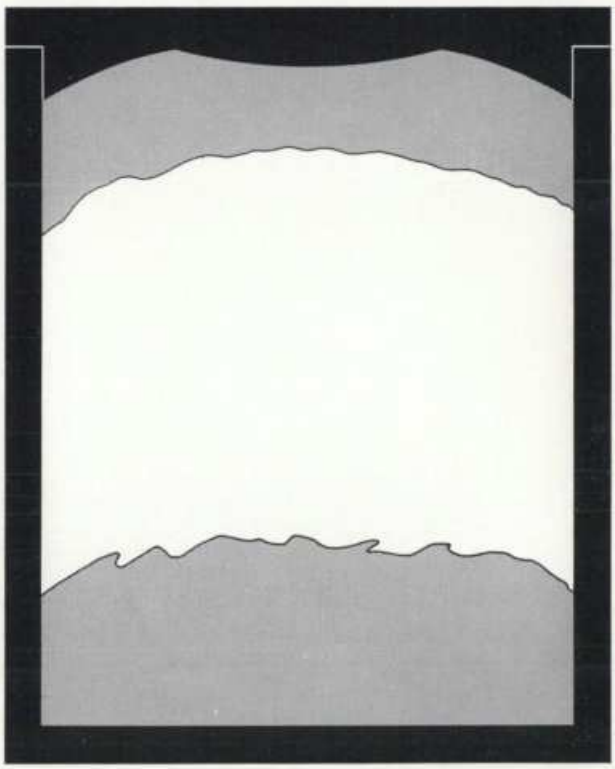


Fig. 1. Het maken van een mortier van siliciumcarbide in een cilinder van kool. Uit silicium- en koolstofhoudende dampen kristalliseert siliciumcarbide op de deksel, die de vorm heeft van het negatief van het gewenste mortier.

Hiermee zal duidelijk zijn dat dit mortier het gebruikelijke assortiment mortieren van het analytisch-chemisch laboratorium uitstekend zal kunnen aanvullen: te zamen met het mortier van zuiver borium-

Dr. W. F. Knippenberg, G. Verspui en J. Visser zijn medewerkers van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

carbide, dat men nodig blijft hebben voor de bepaling van silicium, en het mortier van aluminiumoxide, als men ook nog koolstof wenst te bepalen, maakt het een sporenanalyse op alle elementen mogelijk.

Het mortier wordt gemaakt van polykristallijn siliciumcarbide van grote zuiverheid (de verontreiniging bedraagt ten hoogste enkele honderdduizendste procenten). Dit materiaal verkrijgt men door thermische ontleding van methyldichloorsilaan in aanwezigheid van waterstof [4]. Het aldus verkregen siliciumcarbide wordt in een koolkroes op 2600 °C in een inert gas verhit. Bij deze temperatuur ontleedt het siliciumcarbide in silicium- en koolstofhoudende dampen. Op de kroes wordt als deksel een koolplaat in de vorm van een negatief van het gewenste mortier geplaatst. De temperatuur van de deksel wordt tussen 2400 en 2500 °C gehouden. Bij deze temperatuur zet zich siliciumcarbide tegen de deksel af, terwijl rekristallisatieprocessen bevorderen dat de afgezette laag een grote dichtheid verkrijgt. In de laag vormen zich relatief grote monokristallen: ongeveer 0,1 cm dik en met een oppervlakte van ongeveer 1 cm². *Fig. 1* laat een doorsnede zien van de koolplaat waarop zich siliciumcarbide heeft afgezet.

Fig. 2. Een mortier van siliciumcarbide, gevat in een plastieken houder. Duidelijk zijn links op de rand de relatief grote monokristallen zichtbaar waaruit het mortier is opgebouwd. Ook de stamper is van silicumcarbide (eveneens gevat in een plastieken houder).

Is de gewenste laagdikte bereikt, dan verbrandt men de koolplaat. De nabewerking van het mortier gebeurt met behulp van diamantpoeder. In *fig. 2* is een SiC-mortier, vastgekit in een plastieken houder, weergegeven.

Voor het maken van de bij het mortier behorende stamper volgt men een soortgelijke weg. Men „sublimeert" op de boven beschreven wijze een zekere hoeveelheid siliciumcarbide tegen een vlakke koolplaat, en uit een ruw brok van het verkregen materiaal slijpt men de stamper in de gewenste vorm. Het slijpen gebeurt wederom met behulp van diamantpoeder.

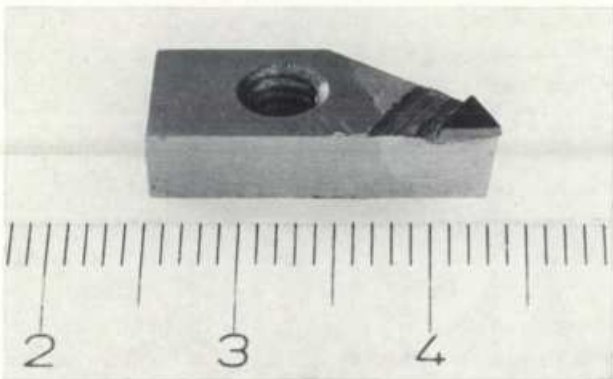


Fig. 3. Een beitel van siliciumcarbide geslepen uit een monokristal (de driehoek op de punt). Met behulp van een goud-tantaal-legering is de beitel bij een temperatuur van 1300 °C op een molybdeenstaaf gelast.

Men past het zuivere, „gesublimeerde" siliciumcarbide ook toe als materiaal voor beitels. Er is behoefte aan zulke beitels voor het afdraaien of frezen van materialen die men in spaandervorm wil analyseren en die dan niet gecontamineerd mogen zijn met de gangbare beitelmaterialen. De SiC-beitels worden, zoals ook de stampers, tot de gewenste vorm geslepen. Het ruwe materiaal kan zijn een polykristallijn fragment, of zo men wil een der monokristallen waaruit dit is opgebouwd. Het formaat van de monokristallen is hiervoor groot genoeg. *Fig. 3* laat een beitel zien waarvan de SiC-kop door middel van een goud-tantaal-legering op een molybdeenstaaf is gelast.

[1] Zie b.v. O. G. Koch en G. A. Koch-Dedic, Handbuch der Spurenanalyse, Springer, Berlijn 1964.
[2] Zie b.v. N. W. H. Addink, Chem. Weekblad **56**, 622, 1960 en A. Claassen, Chem. Weekblad **58**, 33, 1962.
[3] W. F. Knippenberg, Philips Res. Repts. **18**, 251, 1963.
[4] W. F. Knippenberg, Philips Res. Repts. **18**, 205, 1963.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een klystronvermenigvuldiger voor het opwekken van 0,8-mm-golven

B. B. van Iperen en W. Kuypers

621.385.623.5

Toen in het begin van de jaren '50 de meest stormachtige periode in de ontwikkeling der microgolfbuizen achter de rug was, heerste algemeen de opvatting dat het met behulp van de toen gangbare principes moeilijk, zo niet onmogelijk zou zijn golflengten te bereiken van minder dan enkele millimeters. In de meeste onderzoekingscentra waar men zich het probleem gesteld had wegen te vinden voor het opwekken van kortere golven, ging men bijgevolg andere methodes voor het opwekken van microgolven zoeken en bestuderen.

De laatste jaren echter ziet men de „klassieke principes" weer veld winnen. Dank zij verbeterde theoretische inzichten en nieuwe technologische mogelijkheden slaagt men er thans zelfs in deze principes toe te passen voor het opwekken van submillimetergolven. Een voorbeeld van deze nieuwe ontwikkeling wordt in dit artikel beschreven. Het betreft hier een buis waarmee men 0,8-mm-golven kan opwekken met een continu vermogen van enige tientallen milliwatts.

Inleiding

Een van de meest gebruikte bronnen voor cm- en mm-golven is het reflexieklystron. Buizen van dit type zijn eenvoudig in het gebruik en leveren een continu vermogen dat voor vele doeleinden ruim voldoende is [1]. Het is echter tot nu toe niet mogelijk gebleken ook continu werkende reflexieklystrons te maken voor het submillimetergebied: de kortste golflengte die met deze buizen is bereikt, bedraagt ongeveer 2 mm. De voornaamste oorzaak van deze begrenzing is dat het reflexieklystron zelf een oscillator is, en er dus voldaan moet zijn aan de oscillatievoorwaarde [2]. Deze luidt: de som van de elektronische admittantie en de trilholteadmittantie moet negatief zijn. Daar de resonantie-admittantie van de trilholte omgekeerd evenredig is met de wortel uit de golflengte, wordt het bij het verkleinen van de golflengte steeds moeilijker om aan de oscillatievoorwaarde te voldoen. Daarnaast zijn er ook zwaar wegende problemen van minder principiële aard, zoals de met de golflengte samenhangende zeer kleine afmetingen, de katodebelasting en de warmteafvoer. Het lijkt dan ook niet waarschijnlijk dat men binnen afzienbare tijd met behulp van het reflexieklystron een golflengte van minder dan 1 mm zal kunnen bereiken.

Gedurende de laatste jaren is in het Philipslaboratorium te Eindhoven onderzoek gedaan naar de mogelijkheid kortere microgolven op te wekken met behulp van een (gewoon) klystron dat niet als oscillator werkt maar als frequentievermenigvuldiger. Deze methode heeft het grote voordeel dat er *niet* voldaan behoeft te zijn aan een oscillatievoorwaarde. Men is daardoor bij het ontwerpen van de buis vrijer in de keus van sommige grootheden, waardoor bepaalde problemen gemakkelijker op te lossen zijn dan bij een reflexieklystron.

Drs. B. B. van Iperen en ir. W. Kuypers zijn medewerkers van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven.

De grondslag van de methode is het feit dat in de in snelheid gemoduleerde elektronenbundel van een klystron behalve de grondfrequentie van het stuursignaal ook een groot aantal harmonischen daarvan kan voorkomen. Als het stuursignaal en de looptijd tussen de beide trilholten geschikt gekozen worden, zijn deze hogere harmonischen zelfs relatief sterk [3]. Zo kan, volgens een eenvoudige theorie waarin wordt afgezien van de krachten tussen de elektronen onderling, de amplitude van de tiende harmonische in de bundelstroom zelfs meer dan de helft bedragen van die van de eerste. In werkelijkheid is de situatie nog gunstiger. Stemt men de uitgangstrilholte af op de tiende harmonische van de stuurfrequentie, dan wordt dus door de bundel energie afgegeven in de vorm van een trilling die de tienvoudige frequentie van het stuursignaal heeft (*fig. 1*).

Nadat enige tijd geleden bevredigende resultaten waren verkregen met een aldus werkende buis voor 2,5 mm [4], is het thans gelukt met deze methode door te dringen in het submillimetergebied. Dit is in hoofdzaak te danken aan het feit dat wij in de als frequentievermenigvuldiger werkende buizen de elektronensnelheid drastisch verhoogd hebben: de bundelspanning V_0 — bij reflexieklystrons 2 tot 2,5 kV — bedraagt hier niet minder dan 25 kV. De buis die we in dit artikel bespreken willen [5], levert een continu vermogen van 35 mW bij een golflengte van 0,87 mm.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

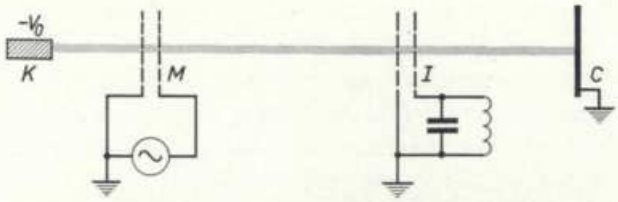


Fig. 1. Principe van de werking van een klystron. K katode. V_0 versnellingsspanning voor de elektronen (de zg. bundelspanning). M twee modulatieroosters, waartussen de elektronenbundel in snelheid wordt gemoduleerd doordat er op M een wisselspanning is aangesloten, het stuursignaal. In de veldvrije ruimte tussen M en I ontstaat ten gevolge van de snelheidsmodulatie geleidelijk een dichtheidsmodulatie doordat de elektronen die in M versneld zijn de eerder gepasseerde die vertraagd werden, inhalen: de elektronenbundel, die bij M een „gelijkstroom" was, is bij de inductieroosters I een „wisselstroom" geworden met de frequentie van het stuursignaal. Onder bepaalde omstandigheden bevat deze wisselstroom in sterke mate hogere harmonischen. Men kan de buis dan doen werken als *frequentievermenigvuldiger*, door de op I aangesloten trillingskring af te stemmen op de frequentie van een dezer hogere harmonischen. In de buis voor 0,8-mm-golven is dat de tiende. In werkelijkheid zijn M en I geen paren roosters met daarop aangesloten afzonderlijke trillingskringen, maar doorboorde trilholten.

In het nu volgende hoofdstuk zullen we uiteenzetten wat de betekenis is van het verhogen van de bundelspanning en iets zeggen over de factoren die de gunstige waarde van de bundelstroom bepalen. In het derde hoofdstuk, ten slotte, bespreken we de constructie en de voornaamste eigenschappen van de nieuwe 0,8-mm-buis.

Theoretische overwegingen

Zoals gezegd, kan men de zwaarste belemmering voor het construeren van buizen voor zeer korte golven elimineren door niet langer te werken met een oscillator maar over te gaan op een frequentievermenigvuldiger. Tevens wordt daardoor de vermelde verhoging van de bundelspanning V_0 mogelijk; dit geeft een aanmerkelijke verlichting van de overige moeilijkheden, zoals het feit dat bij zeer korte golven de afmetingen van de trilholtes en hun onderlinge afstand uiterst gering worden, de beperkingen die men zich moet opleggen in verband met de toelaatbare belasting van de katode enz.

Door V_0 te verhogen, vergroot men de zg. elektronische golflengte, dat is de afstand die de elektronen per periode van het stuur- of uitgangssignaal afleggen; deze afstand is evenredig met $\sqrt{V_0}$. We willen nu uiteenzetten welke voordelen het vergroten van de elektronische golflengte biedt.

a) Door V_0 te verhogen, kan men de diameter van de elektronenbundel groter kiezen en dus de katodebelasting verlagen. Dit blijkt direct uit de volgende overweging. Voor een goede wisselwerking tussen bundel en trilholte mag de looptijd van een elektron in het elektrische wisselveld van de interactieruimte (zie *fig. 2a*) niet veel langer zijn dan een halve periode van dit veld. In de eerste plaats mag dus de spleetbreedte d niet veel groter zijn dan een halve elektronische golflengte. Hiermee is aan de genoemde eis echter nog niet voldaan: bij relatief kleine d strekt het elektrische veld zich langs de as van de trilholte uit over een lengte die van dezelfde orde van grootte is als de diameter $2r$ van de interactieruimte. Deze diameter mag dus voor een goede wisselwerking eveneens niet veel groter zijn dan een halve elektronische golflengte. Hetzelfde geldt derhalve voor de bundeldiameter. In onze buis is het de op het *uitgangssignaal* betrokken elektronische golflengte, die de bundeldiameter bepaalt; deze is immers veel kleiner dan die welke voor de ingangstrilholte geldt.

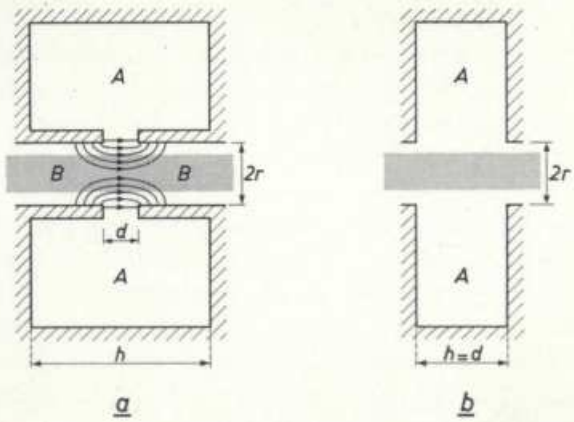


Fig. 2. *a*) Doorsnee van een trilholte van het type dat vaak in klystrons wordt gebruikt (re-entrant cavity), met een hiermee in wisselwerking zijnde elektronenbundel (de geschaduwde strook). A trilholte. De bundel passeert deze door het bundelgat B, in de wand waarvan een spleet ter breedte d is uitgespaard, de zg. interactiespleet. Het deel van het bundelgat waarin het elektrische veld relatief sterk is, noemt men de interactieruimte (zie het geschetste verloop van de elektrische krachtlijnen). Voor een goede wisselwerking tussen trilholte en bundel is nodig dat de diameter $2r$ van de interactieruimte en de spleetbreedte d, ten hoogste ongeveer gelijk zijn aan de halve „elektronische golflengte" van de bundel.
b) Voorbeeld van een platte trilholte, zoals toegepast in de buis voor 0,8-mm-golven. De letters hebben dezelfde betekenis als in (*a*). De inspringende delen ontbreken hier, zodat de spleetbreedte d gelijk is aan de hoogte h. Zo'n trilholte is ook voor zeer kleine golflengten nog te maken, en heeft een betere warmte-afgifte.

b) Het uitgangsvermogen neemt evenredig met V_0 toe. Dit hangt samen met de eigenschappen van de uitgangstrilholte. Voor golflengten beneden ongeveer 1 mm is het bezwaarlijk om gebruik te maken van trilholten als getekend in fig. 2a. In de eerste plaats zijn de inspringende gedeelten wegens de kleine afmetingen dan moeilijk te vervaardigen. Bovendien bestaat er gevaar voor te sterke verhitting van deze gedeelten door de erop vallende bundelelektronen. Wij maken

[1] B. B. van Iperen, Reflexieklystrons voor 4 en 2,5 mm golflengte, Philips techn. T. **21**, 225-232, 1959.
[2] Zie het aangehaalde artikel [1], blz. 230 e.v. (verg. 3).
[3] Dit is voor het eerst opgemerkt door D. L. Webster, J. appl. Phys. **10**, 501-508, 1939.
[4] B. B. van Iperen, Proc. IEEE **51**, 935-937, 1963.
[5] Zie ook B. B. van Iperen en W. Kuypers, An experimental CW-klystron multiplier for submillimeter waves, Philips Res. Repts. **20**, 1965 (no. 4).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

daarom gebruik van een zg. platte trilholte (fig. 2*b*). De resonantiefrequentie van zo'n trilholte wordt in hoofdzaak bepaald door de afmetingen loodrecht op de bundel. De hoogte h ervan kan men in eerste instantie vrij kiezen. Het is voordelig deze hoogte groot te kiezen, omdat dan de resonantie-impedantie groot wordt (deze is evenredig met h^2) en dus ook het uitgangsvermogen. Dit is vooral van belang omdat een platte trilholte iets onvoordeliger is uit een oogpunt van energieafgifte door de bundel. Men wordt in het vergroten van h echter beperkt door het feit dat h hier gelijk is aan de spleetbreedte en derhalve eveneens niet groter mag zijn dan ongeveer een halve elektronische golflengte. Ook ter verkrijging van een flink uitgangsvermogen is het dus van belang V_0 hoog te kiezen; zoals gezegd, is dit vermogen evenredig met de resonantie-impedantie en derhalve met V_0.

c) De optimale afstand tussen de middens van de twee trilholten neemt bij verhoging van de bundelspanning toe; bij constant ingangsvermogen zelfs meer dan evenredig. Door de bundelspanning in de buurt van 25 kV te kiezen, wordt bereikt dat er voldoende ruimte aanwezig is voor het onderbrengen van trilholten van optimale afmetingen, met hun afsteminrichtingen en aansluitingen, terwijl tevens gezorgd kan worden voor een goede afvoer van het in de trilholten gedissipeerde vermogen.

de bundel tegen en wordt de vorming van harmonischen verstoord. De berekening van de invloed van dit effect blijkt een gecompliceerd probleem te zijn, dat alleen opgelost kan worden met behulp van een snelle elektronische rekenmachine en waarvan de behandeling buiten het bestek van dit artikel valt [6].

Uit onze berekeningen blijkt, merkwaardig genoeg, dat opvoeren van de stroomdichtheid aanvankelijk het optreden van hogere harmonischen enigszins begunstigt; het zojuist genoemde nadelige effect treedt pas later op. Verder blijkt de optimale bundelstroom onder meer af te hangen van het rangnummer van de beschouwde harmonische (ofwel: van de factor waarmee de frequentie wordt vermenigvuldigd) en van het beschikbare stuurvermogen; de spanning V_0 daarentegen heeft slechts een geringe invloed. Bij onze buis is bij een stuurvermogen van ongeveer 10 W de gunstigste bundelstroom volgens deze berekeningen ongeveer 20 mA.

Een experimentele buis voor 0,8 mm

Een vereenvoudigde tekening van een doorsnede van de buis vindt men in *fig. 3*. Hierop ziet men van links naar rechts achtereenvolgens het elektronenkanon K, de stuurtrilholte M met afsteminrichting en ingang, het blok I waarin zich de uitgangstrilholte en de uitgang bevinden, en de collector C die de elektronen opvangt. De uitgangstrilholte zelf kan vanwege de kleine afmetingen in deze figuur niet worden getekend. Verder zijn getekend de poolschoenen P van de elektromagneet die zich om de buis bevindt en die het magneetveld levert dat nodig is om divergeren van de elektronenbundel te voorkomen. *Fig. 4* geeft een foto van de buis in de magneet.

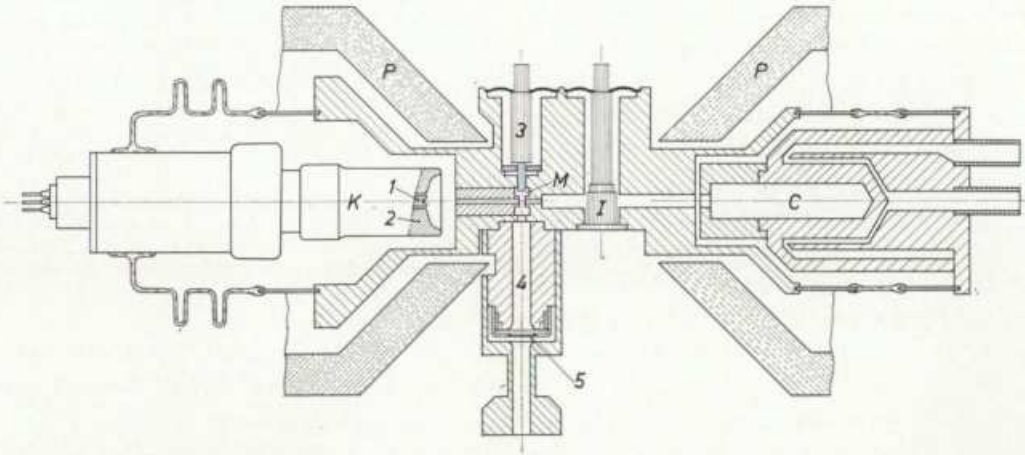


Fig. 3. Vereenvoudigde doorsnede, ongeveer op ware grootte, van de klystronvermenigvuldiger voor 0,87 mm. K elektronenkanon, met katode *1* en focusseer-elektrode *2*. M stuurtrilholte, afgestemd op 8,7 mm. *3* afstempen, beweegbaar via een membraan in de buitenwand van de buis. *4* ingangsgolfpijp, met glazen vacuümvenster *5*. I blok waarin zich de uitgangstrilholte met uitgangsgolfpijp en toebehoren bevindt. (Een doorsnede daarvan op grotere schaal geeft fig. 6.) C collector, met water gekoeld. P poolschoenen van magneet voor focussering.

De bundelstroom

Aan de mate waarin men, ter verhoging van het uitgangsvermogen, de stroomsterkte van de elektronenbundel van een klystron kan opvoeren, wordt een grens gesteld door de invloed van de onderlinge afstoting der elektronen. Bij te grote stroomdichtheid werkt deze afstoting de vorming van de elektronenverdichtingen in

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

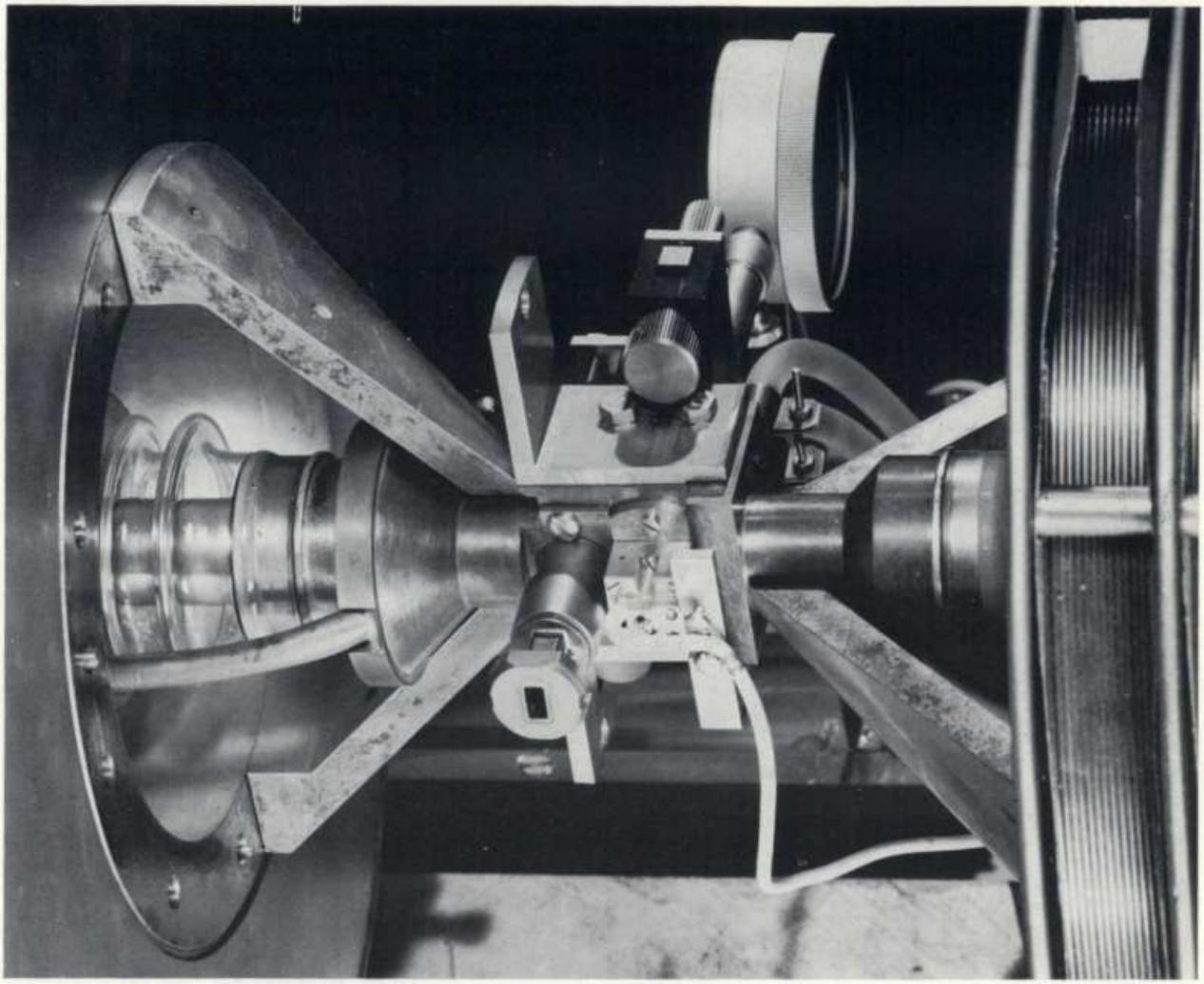


Fig. 4. Het 0,8-mm-klystron in de magneet. Ten einde ook de uiteinden van de buis zichtbaar te maken, is van ieder der beide kegelvormige poolschoenen de helft verwijderd; links bevindt zich het kanongedeelte. Aan de voorkant in het midden ziet men de aansluiting voor de ingangsgolfpijp. Rechts daarvan, deels achter de witte kabel, een op de buis aangebrachte bolometer met thermistor en aanpastransformator voor het meten van het uitgangsvermogen. Midden boven de buis de afstemknop van de uitgangstrilholte. Op de achtergrond een micrometer voor het aflezen van de stand van de afstempen van deze trilholte.

Het elektronenkanon is een zg. Pierce-kanon; het levert bij 25 kV een elektronenbundel met een stroom van 20 mA. De bundel is ongeveer 0,2 mm dik. Doordat de bundel convergeert, is de stroomdichtheid aan het katodeoppervlak beperkt tot 7 A/cm^2; deze waarde ligt ruim beneden de maximumwaarde die voor een moderne L-katode toelaatbaar is. Voor het verkrijgen van een goede bundelvorm is een katode gebruikt waarvan alleen een cirkelvormig deel van het voorvlak emitteert; de rest is niet-emitterend gemaakt [7]. Dit deel doet dus in feite dienst als een zich op katodepotentiaal bevindende focusseerelektrode.

Het stuursignaal wordt geleverd door een 8-mm-klystron.

De uitgangstrilholte is een platte trilholte van rechthoekige vorm, trillend volgens de trillingswijze TE 012. Door deze vorm en trillingswijze te kiezen, verkrijgt men een mogelijkheid de uitgangstrilholte afstembaar te maken. Dit is als volgt in te zien.

Bij de trillingswijze TE 012 staat het elektrische wisselveld in de x-richting (zie *fig. 5*), terwijl het magnetische wisselveld in deze richting nul is. Beide velden zijn onafhankelijk van x maar variëren in de y- en z-richting sinusvormig en wel zo dat zich in de y-richting een halve en in de z-richting een hele golf binnen de trilholte bevindt. Het gat voor de bundel is aangebracht op een plaats waar het elektrische veld maximaal is, d.i. op een afstand $\frac{1}{4}\,l$ van een der eindvlakken (l is de lengte van de trilholte in de z-richting). Op een afstand $\frac{1}{4}\,l$ van de eindvlakken is de y-component van het magnetische veld nul. Aangezien de stroom in de wand

[6] Zie hiervoor: B. B. van Iperen en H. J. C. A. Nunnink, Harmonics in velocity-modulated cylindrical electron beams, Philips Res. Repts. **20**, 1965 (no. 4). Zie ook B. B. van Iperen en H. J. C. A. Nunnink, C. R. 5^{me} Congrès int. tubes hyperfréquences, Parijs 1964.

[7] Het daarbij toegepaste procédé is ontwikkeld door dr. R. Levi (Philips Metalonics; Mt. Vernon, N. Y., U.S.A.). Een beschrijving ervan vindt men in E. S. Rittner en R. Levi, J. appl. Phys. **33**, 2336, 1962.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

loodrecht op het aangrenzende magneetveld staat, is daar dus de z-component van de wandstroom eveneens nul. Men kan daar dus de trilholte doorsnijden zonder de trillingswijze te verstoren.

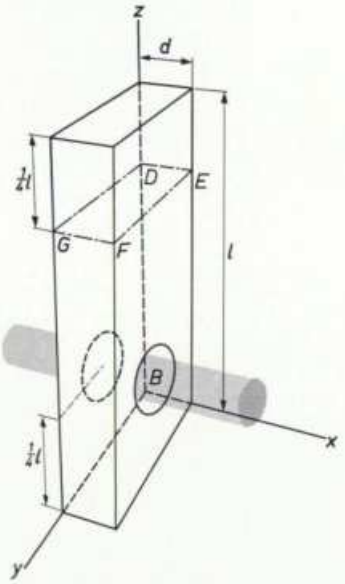


Fig. 5. Rechthoekige platte trilholte, gebruikt als uitgangstrilholte voor 0,87-mm-golven. De trilholte wordt aangestoten in de trillingsvorm TE 012; daarbij staat het elektrische wisselveld in de x-richting, terwijl het magnetische wisselveld in die richting nul is. B bundelgaten. Langs de lijnen $DEFG$ kan de trilholte worden doorgesneden zonder dat de trillingswijze wordt gestoord. Hiervan wordt gebruik gemaakt om de trilholte afstembaar te maken.

Van dit laatste nu is gebruik gemaakt om de trilholte afstembaar te maken. Hij is daartoe samengesteld uit twee delen waarvan het ene $\frac{3}{4}\,l$ lang is en het andere $\frac{1}{4}\,l$. Het eerstgenoemde deel bevat het bundelgat en is vast in de buis opgesteld. Het andere kan, door middel van een membraan in de wand van de buis, bewogen worden in de z-richting. Op deze wijze kan de trilholte ongeveer 5% worden verstemd zonder dat de impedantie noemenswaard verandert.

De praktische uitvoering van de uitgangstrilholte is weergegeven in de perspectivische tekening *fig. 6*. In deze figuur ziet men verder nog de uitgangsgolfpijp, die van de eigenlijke trilholte is gescheiden door twee schotjes waartussen een koppelgat is uitgespaard. Het andere einde van deze taps verlopende golfpijp is vacuümdicht afgesloten door een micavenster van 5 μm dik. De kleine afmetingen — het volume van de trilholte is ongeveer 0,1 mm³ — en de hoge eisen die gesteld moeten worden aan de nauwkeurigheid van de afmetingen en aan de kwaliteit van de oppervlakken, maken het noodzakelijk bijzondere technieken als „hobben", „optisch" frezen, en diffusielassen toe te passen. Het blijkt dan echter mogelijk een kwaliteitsfactor en een impedantie te bereiken die slechts weinig beneden de theoretische waarde liggen.

Enige van de belangrijkste eigenschappen

Tot slot vermelden we enige van de belangrijkste eigenschappen van de nieuwe buis. In *fig. 7* vindt men het resultaat van metingen omtrent het verloop van het uitgangsvermogen P_0 bij 0,87 mm als functie van het stuurvermogen P_1 (golflengte 8,7 mm). De kromme geldt voor een bundelspanning van 25 kV en een bundelstroom van 20 mA. Dit meetresultaat stemt redelijk goed overeen met het berekende verloop.

Vergelijkt men het maximale uitgangsvermogen dat bij deze bundelspanning en -stroom bereikt kan worden, met het daarvoor vereiste stuurvermogen, dan ziet men dat het omzetten van 8-mm-golven in 0,8-mm-golven gepaard gaat met een zg. conversieverlies van ruim 26 dB. Dit is, gezien de golflengte en het hoge rangnummer van de harmonische waarmee we werken, een zeer bevredigende waarde.

Zoals men ziet, is de kromme van fig. 7 vrij breed;

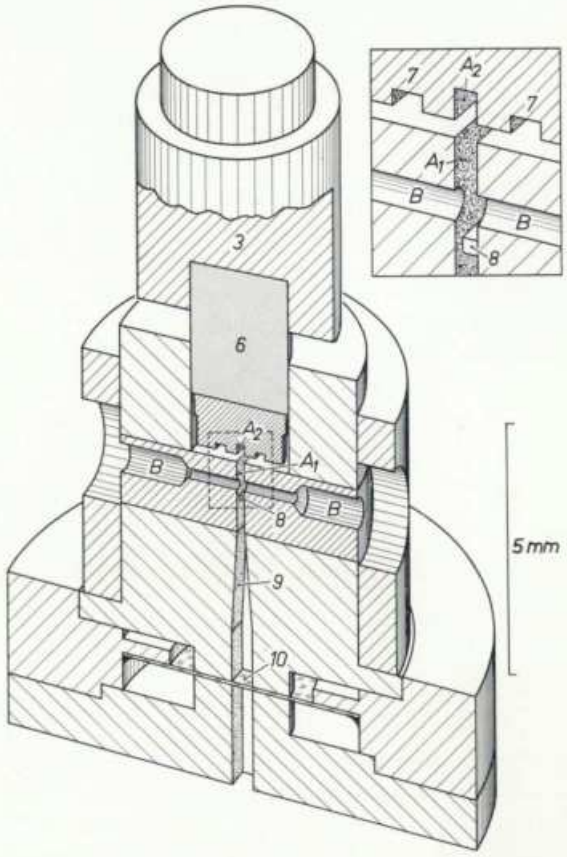


Fig. 6. Perspectivische tekening van de uitgangstrilholte voor 0,87 mm. De trilholte is doorgesneden langs een vlak door de bundelas en evenwijdig met het xz-vlak (zie fig. 5), waarna de voorste helft is verwijderd. A_1 vast gedeelte van de trilholte. A_2 beweegbaar gedeelte van de trilholte, dat door middel van het saffierstaafje *6* op de afstempen *3* is bevestigd. Deze pen kan via een membraan in de buiswand axiaal worden bewogen. *7* smoorgroeven, om lek van het hoogfrequente veld door de spleet tussen A_1 en A_2 tegen te gaan. *8* schotje tussen trilholte en uitgangsgolfpijp. Tussen dit schotje en dat in de weggenomen helft van de constructie, bevindt zich het koppelgat. *9* taps verlopende uitgangsgolfpijp. *10* micavenster van 5 μm dik voor vacuümafdichting. B bundelgat.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

men behoeft dus voor het verkrijgen van een redelijk constant uitgangsvermogen, het stuurvermogen niet al te rigoureus te stabiliseren.

Het feit dat het uitgangsvermogen niet onbeperkt met het ingangsvermogen blijft toenemen, heeft twee oorzaken, die trouwens voor ieder klystron gelden. In de eerste plaats kan de amplitude van elk der harmonischen in de bundel in geen geval groter zijn dan tweemaal de gelijkstroomsterkte van de ongemoduleerde bundel. In de tweede plaats hangt de positie van het punt waar de verdichtingen het sterkst zijn, en waar dus het grootste uitgangsvermogen kan worden afgenomen, af van het ingangsvermogen: er is slechts één waarde van het ingangsvermogen waarbij het juist op de plaats valt waar zich de uitgangstrilholte bevindt. Dit verklaart waarom de kromme een maximum vertoont.

Gebleken is dat er, bij gering stuurvermogen, onderweg ten hoogste 0,5 % van de bundelelektronen verloren gaat; de rest bereikt de collector. Bij toenemend stuurvermogen neemt het verlies toe: bij de optimale waarde van het stuurvermogen bedraagt het ongeveer 7 %. Deze getallen gelden bij een sterkte van het focusserend magneetveld van 0,37 Wb/m² (3700 gauss).

Fig. 8 toont het verloop van $P_{o\,max}$, het maximale uitgangsvermogen bij 0,87 mm, en van $P_{i\,max}$, het bijbehorende stuurvermogen bij 8,7 mm, als functie van de bundelspanning, en wel bij een constante waarde van de perveantie — dat is de verhouding van de bundelstroom tot $V_0^{3/2}$. De figuur laat zien dat een uitgangsvermogen van 1 mW reeds wordt bereikt bij een bundelspanning van 16 kV; daarbij is de bundelstroom 10 mA, en het stuurvermogen 8 W. Bij 28 kV, de hoogste spanning waarbij is gemeten, bedraagt het uitgangsvermogen 35 mW bij een stuurvermogen van slechts ca. 15 W. De gemeten waarden van het stuurvermogen zijn binnen 20 % in overeenstemming met de waarden berekend met behulp van de in het aangehaalde artikel [6] gegeven theorie. Ook wat het uitgangsvermogen betreft, lijkt de genoemde theorie door de metingen te worden bevestigd. Het verschil bedroeg hier naar schatting ten hoogste 30 %. Een nauwkeurige vergelijking is hier voorshands niet mogelijk aangezien de meetmethodes in het submillimetergebied daarvoor nog niet voldoende zijn ontwikkeld.

Alles bijeengenomen, mag gezegd worden dat het opwekken van 0,8-mm-golven met redelijk groot continu vermogen door middel van een als frequentievermenigvuldiger werkend klystron zeer goed mogelijk is gebleken. Men mag de hoop koesteren dat het binnen afzienbare tijd zal gelukken met behulp van deze methode nog verder in het submillimetergebied door te dringen.

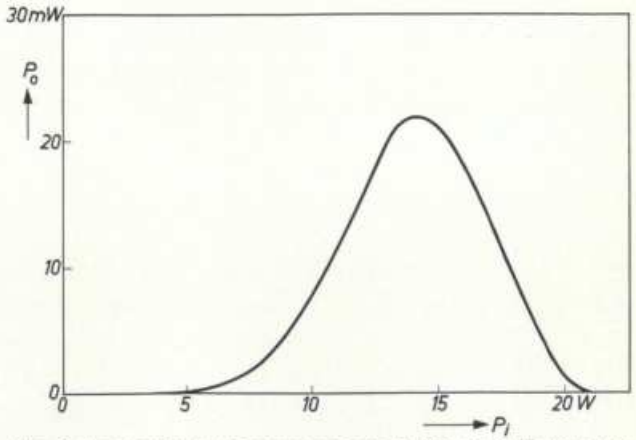


Fig. 7. Het continue uitgangsvermogen P_0 bij een golflengte van 0,87 mm als functie van het stuurvermogen P_i bij 8,7 mm. Bij deze metingen was de bundelspanning 25 kV, de bundelstroom 20 mA en het focusserend magneetveld 0,37 Wb/m² (3700 gauss). De curve is vrij breed; ter verkrijging van een redelijk constant uitgangsvermogen behoeft P_i dus niet al te drastisch gestabiliseerd te worden.

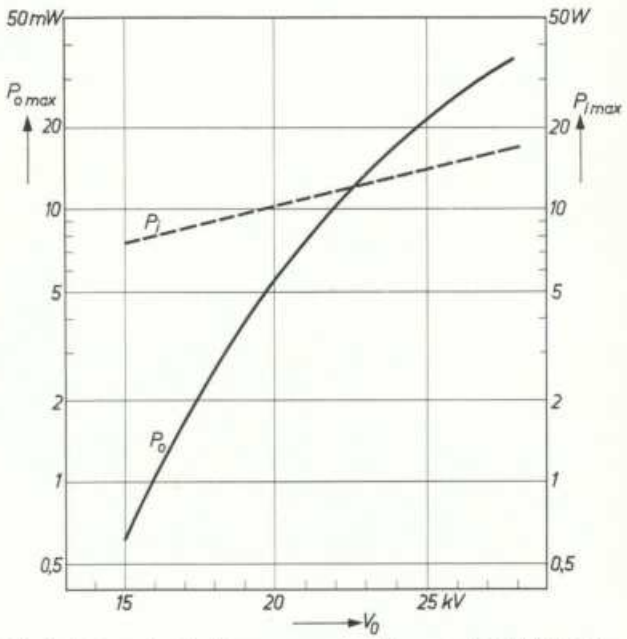


Fig. 8. Het maximale uitgangsvermogen $P_{o\,max}$ en het bijbehorende stuurvermogen $P_{i\,max}$ als functie van de bundelspanning V_0 bij constante waarde van de perveantie (in casu 5×10^{-9} A/V$^{3/2}$).

Samenvatting. Het is gelukt submillimetergolven (golflengte 0,87 mm) met een continu vermogen van enkele tientallen mW op te wekken met behulp van een klystron dat als frequentievermenigvuldiger werkt. De uitgangstrilholte is daartoe afgestemd op de tiende harmonische van de stuurfrequentie. Men is bij deze methode niet gebonden aan een oscillatievoorwaarde. Tevens is het hierbij mogelijk de bundelspanning zeer veel hoger te kiezen (ca. 25 kV) dan bij een reflexieklystron (ca. 2,5 kV), wat een aantal belangrijke voordelen oplevert. Men kon daardoor o.m.: a) de diameter van de bundel vergroten (deze is ca. 0,2 mm), wat tot een lagere katodebelasting leidt; b) als uitgangstrilholte een platte trilholte toepassen (betere koeling, gemakkelijker te maken) zonder dat dit ten koste gaat van het uitgangsvermogen; c) de afstand tussen ingangs- en uitgangstrilholte groter maken, waardoor constructieruimte ontstaat. De uitgangstrilholte is een rechthoekige doos (trillingswijze TE 012) die mechanisch ongeveer 5 % verstemd kan worden. De bundel (20 mA) wordt bijeengehouden door een magneetveld van 0,37 Wb/m² (3700 gauss). Het hoogste uitgangsvermogen dat bereikt is (35 mW), vereiste een stuurvermogen van slechts ca. 15 W.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De harpkatode, een katode met geringe thermische traagheid voor kleine zendbuizen

H. G. Gerlach

621.385.1.032.213.1

Bij mobiele zendontvangers wordt gedurende een zeer groot gedeelte van de tijd alleen de ontvanger gebruikt. Men kan een belangrijke energiebesparing verkrijgen door de zender dan geheel uit te schakelen. Wil men echter in deze situatie een oproep normaal kunnen beantwoorden, dan moeten de in de zender gebruikte buizen aan de voorwaarde voldoen dat zij zeer korte tijd na het inschakelen reeds functioneren. Hiertoe is een katode ontwikkeld die uiterst snel de vereiste werktemperatuur bereikt.

Het gebruik van mobiele zendontvangers voor telefonie (mobilofoons) is gedurende de laatste twee decennia sterk toegenomen. Een belangrijke stimulans hiervoor is de voortdurend toenemende behoefte aan dergelijke verbindingen voor overheidsdiensten, artsen, enz. Verder schept de voortschrijdende techniek steeds meer toepassingsmogelijkheden voor mobiele verbindingen. Wij denken hier b.v. aan het gebruik van hogere frequenties, waardoor het aantal tegelijk in bedrijf zijnde verbindingen (kanalen) groter kan zijn, en aan het gebruik van transistors in ontvangers en gedeeltelijk ook in zenders, waardoor de voeding van mobiele apparaten minder problemen opwerpt.

In vele gevallen wordt bij het gebruik van mobilofoons gedurende een groot deel van de tijd alleen geluisterd. Het zendgedeelte wordt slechts af en toe ingeschakeld, maar moet toch steeds voor onmiddellijk gebruik gereed zijn. In dit opzicht levert een zender die geheel met transistors is uitgerust geen probleem op. Bij de huidige stand van de techniek is men echter voor de laatste trappen van de meeste mobilofoonzenders nog aangewezen op het gebruik van buizen. Met name is dit het geval als een vermogen van ten minste enkele watts bij een frequentie van enkele honderden megahertz moet worden geleverd. Omdat de hiervoor in aanmerking komende buizen meestal zijn voorzien van een indirect verhitte katode, waarvan de opwarmtijd ongeveer 20 seconden bedraagt, moeten de gloeidraden steeds ingeschakeld blijven. Dit betekent een extra-energieverbruik, dat voor normale mobilofoons 10 à 20 W bedraagt. Daar een ontvanger met buizen 15 à 30 W verbruikt, en een toestel met transistors zelfs slechts 1 à 2 W, kan een relatief grote besparing aan energie worden verkregen als de gloeidraden van de buizen in het zendgedeelte tijdens de zendpauzes kunnen worden uitgeschakeld. Een dergelijke besparing is voor mobiele apparaten belangrijk omdat deze doorgaans worden gevoed uit een batterij of een accu.

Wat betekent het nu precies dat de zender steeds „voor onmiddellijk gebruik" gereed moet zijn? In de praktijk is gebleken dat de vertragingstijd die als voldoende klein kan worden beschouwd, afhangt van de manier waarop de zender wordt ingeschakeld. Gebeurt dit door een microtelefoon van de haak te nemen, dan moet de zender binnen 1 seconde voor gebruik gereed zijn. Wordt de zender ingeschakeld door het indrukken van een schakelknop, dan is deze tijd maximaal 0,5 seconde. Een derde mogelijkheid is dat het stemgeluid van de persoon die de zender bedient, de inschakeling tot stand brengt; in dit geval mag maximaal 0,1 seconde verlopen tussen het moment van inschakelen en het ogenblik waarop de zender werkt. De opwarmtijd van de katodes van de zendbuizen mag dus ten hoogste gelijk zijn aan de bovengenoemde tijden. Wij zullen hier onder opwarmtijd verstaan de tijd die verloopt tussen het ogenblik van inschakelen en het moment waarop het aan de antenne geleverde vermogen de helft is van de waarde die dit vermogen na langere tijd bereikt.

In het hierna volgende geven wij eerst een theoretische beschouwing over het opwarmen van katodes. Daarna wordt de door Philips ontwikkelde harpkatode besproken, waarvan de opwarmtijd 0,35 seconde bedraagt. Door een kunstgreep kan deze tijd desgewenst tot 0,1 seconde worden teruggebracht.

Het opwarmen van een katode

We zullen eerst de opwarmtijd van een katode in de vorm van een homogene staaf of draad berekenen voor het geval dat hieraan een constant elektrisch ver-

Ir. H. G. Gerlach is medewerker van Philips' Hoofdindustriegroep Elektronenbuizen, Eindhoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

mogen P (watts) wordt toegevoerd. Hiertoe stellen wij de warmtecapaciteit van de katode op K (gcal/°K). Verder zij T (°K) de temperatuur, die varieert met de tijd t (s), en T_e de eindtemperatuur, die na langere tijd wordt bereikt.

Het voor het opwarmen beschikbare vermogen is het verschil tussen het toegevoerde vermogen en het bij de bereikte temperatuur door de katode uitgestraalde vermogen [1]. Daar dit laatste vermogen evenredig is met de vierde macht van de temperatuur en daar na het bereiken van de eindtemperatuur het gehele toegevoerde vermogen wordt uitgestraald, geldt de volgende vergelijking:

$$K\frac{dT}{dt} = 0{,}24\,P\left[1-\left(\frac{T}{T_e}\right)^4\right]. \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Door het invoeren van de grootheden

$$A = \frac{KT_e}{0{,}24\,P} \quad \text{en} \quad y = \frac{T}{T_e}$$

gaat (1) over in:

$$A\frac{dy}{dt} = 1-y^4. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Integreren van deze vergelijking geeft:

$$\frac{t}{A} = \int\frac{dy}{1-y^4} = \tfrac{1}{2}\operatorname{arc\,tg}\,y + \tfrac{1}{4}\ln\frac{1+y}{1-y} + C, \quad . \quad (3)$$

waarin C de integratieconstante is. Stellen we ons voor dat de katode wordt opgewarmd vanaf het absolute nulpunt, dan is $y = 0$ voor $t = 0$ en moet dus $C = 0$ zijn. Het dan verkregen verband tussen y en t/A is weergegeven in *fig. 1*. We zien dat bij lage temperaturen, waarbij de straling nog geen rol speelt, de temperatuur lineair met de tijd toeneemt; daarna nadert deze asymptotisch tot de eindwaarde. Begint het opwarmen niet bij $T = 0$, dan geldt dezelfde kromme vanaf de desbetreffende y-waarde.

We beperken ons nu verder tot *direct verhitte* bariumoxidekatodes [2], daar bij de huidige stand van de techniek alleen deze voor ons doel geschikt zijn. (Indirect verhitte katodes hebben een veel te grote warmtecapaciteit.) De eindtemperatuur van deze katodes stellen we op 1000 °K. Nemen we aan dat de aanvangstemperatuur 300 °K bedraagt, dan is de hierbij behorende waarde van y gelijk aan $y_1 = 0{,}3$. Experimenteel is gebleken dat een zendbuis met bariumoxidekatode 50% van het maximumvermogen levert als de katodetemperatuur 800 °K is, dus bij $y_2 = 0{,}8$. Volgens fig. 1 is de afstand langs de horizontale as tussen de punten die corresponderen met y_1 en y_2, $0{,}89 - 0{,}3 = 0{,}59$. De opwarmtijd is dan dus:

$$\tau = 0{,}59\,A = \frac{0{,}59\,KT_e}{0{,}24\,P} = 2460\,\frac{K}{P}. \quad . \quad (4)$$

In werkelijkheid wijkt de katode af van het geval waarvoor de differentiaalvergelijking (1) geldt: de warmte wordt nl. ontwikkeld in de metalen kern, en de bariumoxidelaag moet door geleiding en straling vanuit deze kern worden verwarmd. Het is gebleken dat bij de gebruikelijke dikte van de oxidelaag de opwarmtijd hierdoor met ongeveer 10% wordt verlengd, zodat (4) dan overgaat in:

$$\tau = 2700\,\frac{K}{P}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Een ander feit waarmede in het bovenstaande nog geen rekening is gehouden, is dat in de regel tijdens het opwarmen het toegevoerde vermogen P niet constant is. De weerstand van de gloeidraad neemt immers bij toenemende temperatuur toe, en daar meestal de gloeispanning als constant kan worden beschouwd, is tijdens het opwarmen het toegevoerde vermogen groter dan de waarde die bij de eindtoestand optreedt. Bij twee veel gebruikte materialen voor direct verhitte katodes, nikkel en wolfraam, is de verhouding van de weerstand bij werktemperatuur en die bij kamertemperatuur resp. 5,4 en 5,9. De hiermee overeenkomende vergroting van het vermogen onmiddellijk na het inschakelen veroorzaakt een belangrijke verkorting van de opwarmtijd.

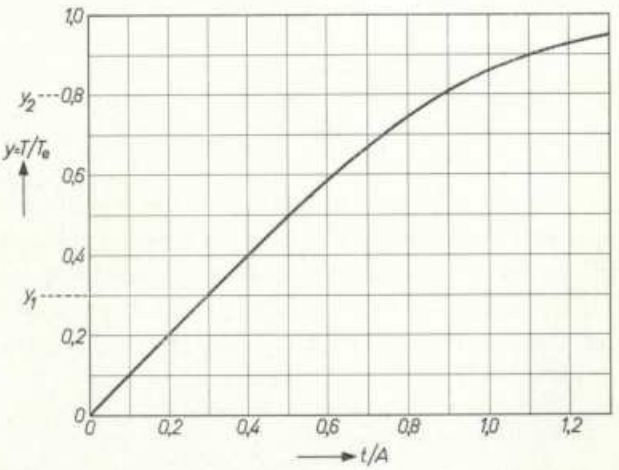


Fig. 1. Temperatuurverloop van een lichaam in de vorm van een homogene staaf of draad waaraan een constant vermogen wordt toegevoerd en waarbij het door geleiding aan de uiteinden verloren vermogen wordt verwaarloosd. Uitgezet is de verhouding y van de absolute temperatuur T tot de eindtemperatuur T_e, als functie van het quotiënt van de tijd t, in seconden, en de grootheid $A = KT_e/0{,}24P$. Hierin is K de warmtecapaciteit in gcal/°K en P het toegevoerde vermogen in watts.

[1] Het vermogen dat aan de uiteinden door warmtegeleiding verloren gaat, kan in verband met de grote lengte van de katodes worden verwaarloosd.

[2] De gebruikelijke oxidekatodes bevatten behalve bariumoxide ook een belangrijk percentage strontiumoxide en soms ook calciumoxide.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Is U de effectieve waarde van de gloeispanning en R de weerstand, dan is $P = U^2/R$ en kan men dus voor (2) schrijven:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{0{,}24\ U^2}{KRT_e}(1 - y^4), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

ofwel:

$$t = \frac{KT_e}{0{,}24\ U^2}\int_{y_1}^{y_2} \frac{R\,dy}{1 - y^4}. \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

De uit (5) volgende waarde van de opwarmtijd, die geldt onder de aanname dat de weerstand R constant is en gelijk aan de eindwaarde R_e, moet dus worden vermenigvuldigd met een factor

$$F = \frac{\int_{y_1}^{y_2} \frac{R\,dy}{1 - y^4}}{R_e \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{1 - y^4}}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Deze factor kan voor verschillende materialen grafisch worden bepaald met behulp van het bekende verband tussen de soortelijke weerstand en de temperatuur. Voor nikkel en wolfraam worden dan bij de genoemde temperatuurgrenzen van 300 en 800 °K voor F resp. de waarden 0,6 en 0,5 gevonden.

Bandkatodes en draadkatodes

We zullen nu twee verschillende katodevormen beschouwen. De eerste is gevormd uit een *band*, waarvan de dikte, lengte en breedte resp. d_1, l en b cm bedragen, en die is bedekt met een bariumoxidelaag ter dikte van d_2 cm (*fig. 2a*). Noemen we de warmtecapaciteit van het kernmateriaal s_1 en die van bariumoxide s_2 (beide in gcal/cm³), dan is voor een dergelijke katode:

$$K = (d_1 s_1 + 2d_2 s_2) lb. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Na het bereiken van de eindtemperatuur is het aan de katode toegevoerde vermogen gelijk aan het uitgestraalde vermogen. Voor bariumoxide is bij 1000 °K dit vermogen ongeveer 1,8 W/cm². Het toegevoerde vermogen in de eindtoestand is dus:

$$P = 2 \times l \times b \times 1{,}8,$$

waardoor met gebruik van (5) voor de opwarmtijd volgt:

$$\tau = 750\ F(d_1 s_1 + 2d_2 s_2). \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

De warmtecapaciteit is voor nikkel en wolfraam resp. $s_1 = 0{,}94$ en $s_1 = 0{,}63$, terwijl voor bariumoxide geldt $s_2 = 0{,}15$ gcal/cm³. Met behulp van deze gegevens en de hierboven reeds aangegeven waarden van F kunnen nu uit (10) de opwarmtijden van verschillende bandkatodes worden berekend. In *fig. 3* zijn de resultaten van een aantal dergelijke berekeningen uitgezet als functie van de dikte d_1 van de band. De krommen *a* gelden voor nikkelband en de krommen *b* voor wolfraamband; in beide gevallen zijn de berekeningen uitgevoerd voor twee verschillende dikten d_2 van de oxidelaag, nl. 20 μm en 40 μm.

De tweede katodevorm die we zullen beschouwen, bestaat uit *ronde draad* met een diameter van d_1 cm, eveneens ter lengte l en met een bariumoxidelaag ter dikte d_2 cm (fig. 2*b*). De warmtecapaciteit hiervan is:

$$K = \frac{\pi}{4}\{d_1^2 s_1 + 4d_2(d_1 + d_2)s_2\}\, l, \quad . \quad (11)$$

terwijl in de eindtoestand het toegevoerde en uitgestraalde vermogen bedraagt:

$$P = \pi(d_1 + 2d_2)l \times 1{,}8. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Hiermee volgt nu voor de opwarmtijd:

$$\tau = 375\ F\frac{d_1^2 s_1 + 4d_2(d_1 + d_2)s_2}{d_1 + 2d_2}. \quad . \quad (13)$$

In fig. 3 zijn ook de met deze formule berekende opwarmtijden van enkele katodes uitgezet, en wel als functie van de dikte d_1 van de metalen kern. De krommen *c* gelden voor nikkeldraad en de krommen *d* voor wolfraamdraad. Ook hier zijn voor de dikte d_2 van de bariumoxidelaag twee waarden genomen, 20 μm en 40 μm.

Uit fig. 3 kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

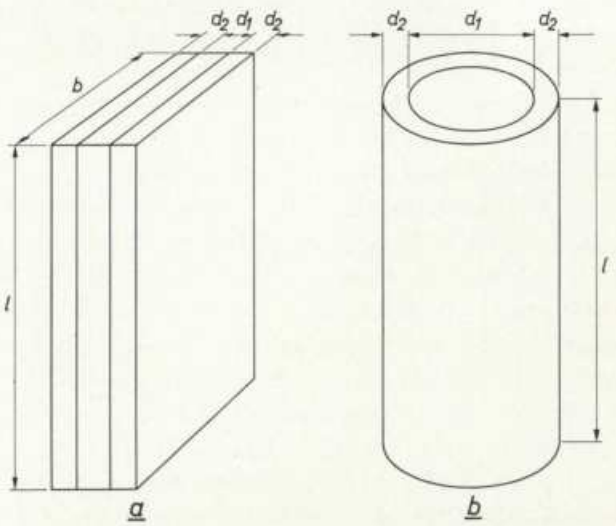


Fig. 2. Twee verschillende vormen van direct verhitte katodes. *a*) Bandkatode ter dikte d_1, aan beide zijden bedekt met een emitterende laag met een dikte d_2.
b) Ronde draad met een diameter d_1, eveneens bedekt met een emitterende laag ter dikte d_2.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

1) Mag de opwarmtijd ongeveer 1 seconde bedragen, dan kan men een katode gebruiken die bestaat uit nikkelband met een dikte van ongeveer 15 μm, wolfraamband van ongeveer 30 μm, nikkeldraad van ongeveer 60 μm of wolfraamdraad van ongeveer 100 μm. In de buis QQC 03/14 is nikkelband toegepast van 14 μm dik met een bariumoxidelaag van 25 μm. De opwarmtijd van deze katode is 0,8 seconde.

2) Wenst men een opwarmtijd van 0,5 seconde, dan zou een eventuele bandvormige katode zo dun moeten zijn dat deze niet meer voor toepassing op technische schaal in aanmerking komt. Uit fig. 3 blijkt immers dat men nikkelband van ongeveer 5 μm of wolfraamband van ongeveer 10 μm zou moeten gebruiken. Vervaardigt men de katode van nikkeldraad, dan kan men een dikte van ongeveer 30 μm nemen; de wolfraamdraad kan in een dikte van 50 μm worden toegepast.

Wolfraamdraad met een dikte van de orde van grootte van 10 μm wordt reeds sinds lang vervaardigd voor gebruik in batterijbuizen [3], en we zien dus uit het bovenstaande het enigszins verrassende feit dat het nagestreefde doel kan worden bereikt met een bestaande draadsoort, die in de buizentechniek niet eens als bijzonder dun wordt beschouwd. Voor de katode die wij hieronder zullen bespreken, is de keuze gevallen op wolfraamdraad met een dikte van 25 μm, d.i. dus aanzienlijk minder dan de grootste toelaatbare dikte. De ervaring heeft nl. geleerd dat bij dikkere draden moeilijkheden ontstaan met de hechting van de bariumoxidelaag op de metalen kern, welke moeilijkheden te wijten zijn aan het verschil in uitzettingscoëfficiënt van wolfraam en bariumoxide. De op de draad aangebrachte bariumoxidelaag is 15 μm dik. De opwarmtijd van de hieruit vervaardigde katodes is 0,35 seconde.

3) Voor een opwarmtijd van 0,1 seconde zou de draad of band zo dun moeten zijn dat dergelijke katodes niet op technische schaal te fabriceren zijn. Het is echter vrij eenvoudig om de opwarmtijd van 0,35 seconde van de onder (2) genoemde katode tot 0,1 seconde terug te brengen. Men voert hiertoe de schakeling zodanig uit dat onmiddellijk na het inschakelen de gloeispanning gelijk is aan ongeveer twee maal de normale waarde.

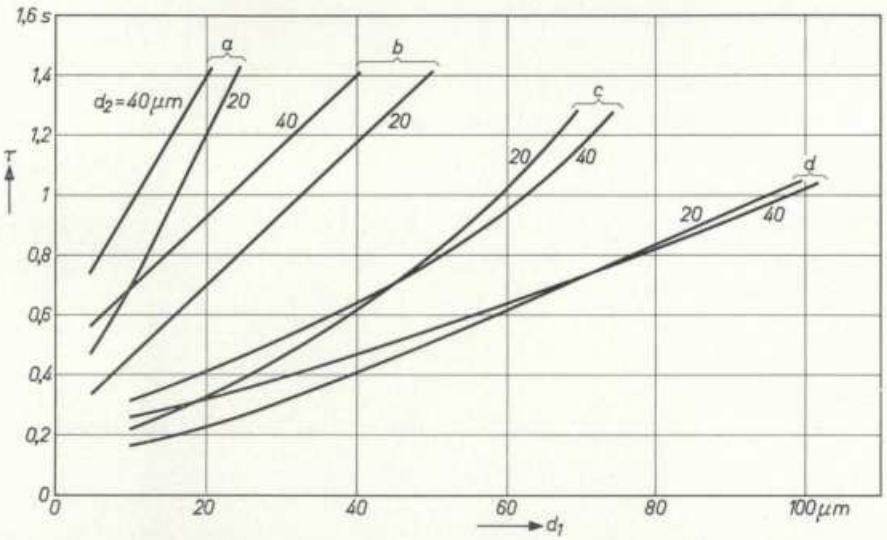


Fig. 3. Opwarmtijd van de in fig. 2 voorgestelde katodes als functie van de kerndikte d_1. *a* nikkelband, *b* wolfraamband, *c* nikkeldraad, *d* wolfraamdraad. De twee krommen voor elke katode gelden voor twee verschillende dikten van de emitterende laag van bariumoxide, nl. $d_2 = 20$ μm en $d_2 = 40$ μm.

Zodra de katode de vereiste temperatuur heeft bereikt, wordt de gloeispanning op de normale waarde teruggebracht. Dit laatste kan geschieden door een relais, waarvan de wikkeling in de anodestroomketen van de buis is opgenomen.

Constructie en montage van de harpkatode

De stroom die de katode in een kleine zendbuis moet leveren, is veel groter dan die welke in een ontvangbuis nodig is (b.v. tien maal zo groot). Het emitterende oppervlak moet in een zendbuis dus groter zijn. Omdat de desbetreffende buizen moeten werken bij hoge frequenties (500 MHz), moet dit grotere oppervlak worden gerealiseerd bij een zeer kleine afstand tussen rooster en katode. Aan deze eisen kan, bij gebruik van het genoemde dunne wolfraamdraad, op eenvoudige wijze worden voldaan als men de katode laat bestaan

[3] L. Schultink en P. G. van Zanten, Dun wolfraamdraad voor kleine radiobuizen, Philips techn. T. **18**, 199-205, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

uit een aantal evenwijdige, in een plat vlak gespannen draden. Het uiterlijk van een op deze wijze vervaardigde katode heeft de naam „*harpkatode*" doen ontstaan.

Deze katode wordt in verschillende vormen toegepast. Hierbij wordt steeds uitgegaan van een tweetal metalen dragers, die ten opzichte van elkaar verschuifbaar zijn langs een elektrisch isolerend tussenstuk. Om de beide dragers wordt dan een aantal windingen van de te gebruiken draad gelegd, welke op de dragers worden vastgelast. Hierna wordt de draad gespannen door de beide metalen dragers met behulp van een veer uit elkaar te trekken. Op deze wijze blijft de draad ook gespannen bij de veranderingen in lengte die door thermische uitzetting ontstaan.

Bij de in *fig. 4a* voorgestelde constructie bestaan de beide dragers ieder uit een metalen pijpje *P*, met rechthoekige doorsnede, waarop een U-vormig kapje *Q* is gelast. Het isolerende verbindingsstuk bestaat uit een micastrookje *M* dat nauwkeurig in de beide pijpjes *P* past. Tijdens het wikkelen van de draad *D* wordt op de plaatsen waar deze op de dragers komt te liggen, de bariumoxidelaag machinaal weggeschraapt.

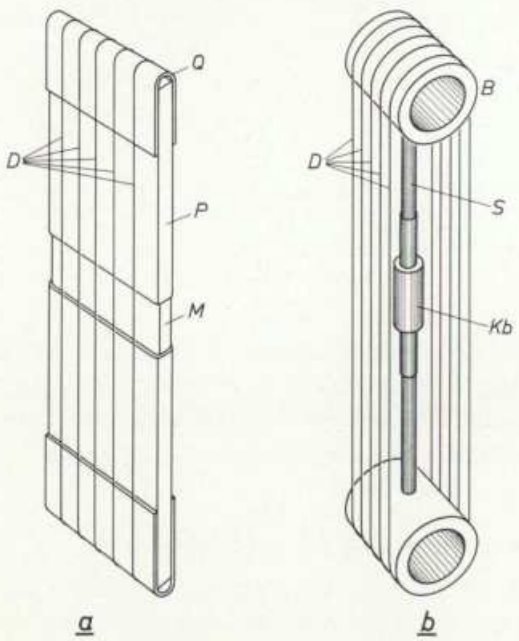


Fig. 4. Twee uitvoeringsvormen van de harpkatode.
a) Uitvoering met micastrookje. *P* metalen pijpjes. *Q* kapjes. *M* micastrookje. *D* wolfraamdraad.
b) Uitvoering met keramisch buisje. *B* metalen buisjes. *S* metalen staafjes. *Kb* keramisch buisje. *D* wolfraamdraad.

Een andere constructie is geschetst in fig. 4*b*. Hier bestaan de dragers ieder uit een metalen buisje *B*, waaraan een staafje *S* is bevestigd. De beide staafjes kunnen glijden in een buisje *Kb* van keramisch materiaal. De draad *D* wordt om de beide buisjes *B* gewikkeld en daarna weer door een veer gespannen.

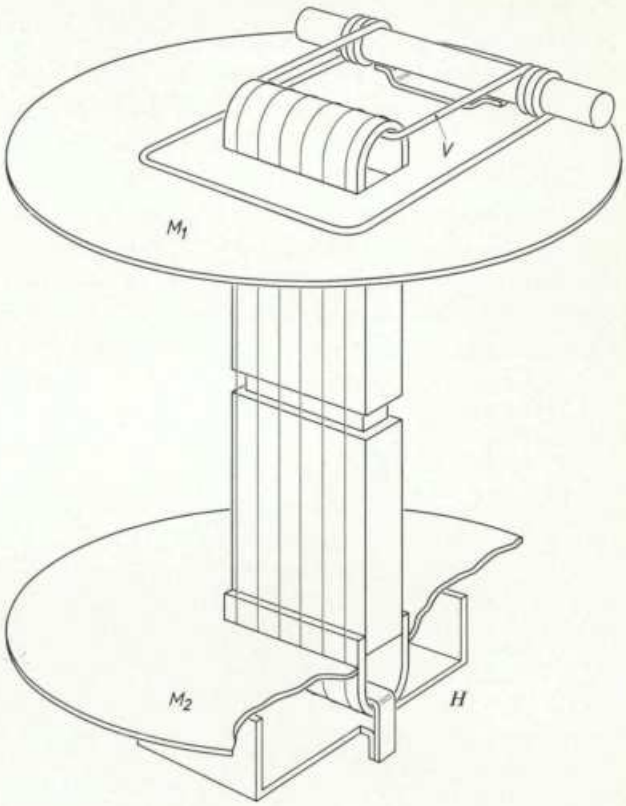


Fig. 5. Montage van een harpkatode. M_1 en M_2 micaplaatjes. *H* beugel. *V* veer.

De aldus verkregen harpkatode wordt in de buis gemonteerd op een wijze die ook voor indirect verhitte katodes gebruikelijk is, nl. door de uiteinden in twee micaplaatjes, M_1 en M_2, te schuiven. In *fig. 5*, waarin dit is geschetst, is tevens getoond hoe de draden worden gespannen; aan de onderzijde is de katode bevestigd aan een metalen beugel *H*, die op het onderste micaplaatje rust. Op het boveneinde wordt door de veer *V* de nodige trekkracht uitgeoefend.

De micaplaatjes M_1 en M_2 dragen tevens de andere onderdelen van het elektrodensysteem. In *fig. 6*, die de constructie van de buis YL 1190 (dubbeltretode) toont, is door het gedeeltelijk wegnemen van één der anodes de montagemethode van de verschillende elektrodes zichtbaar gemaakt.

Eigenschappen van het gebruikte draad

Zoals reeds werd vermeld, wordt wolfraamdraad, bedekt met bariumoxide, reeds lang toegepast als gloeidraad in buizen voor batterijontvangers. Omdat deze toestellen worden gevoed uit accu's of droge batterijen, waarvan de klemspanning vrij sterk kan variëren, moet een tamelijk grote tolerantie in de gloeispanning toegelaten kunnen worden zonder dat dit een ontoelaatbare

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

verkorting van de levensduur van de buizen veroorzaakt. Bij de bovenbedoelde batterij-ontvangbuizen is gebleken dat een afwijking in de gloeispanning van $\pm$ 15% geen nadelige gevolgen heeft. Bij zendbuizen is de vereiste emissie per cm² katodeoppervlak groter dan bij ontvangbuizen en de twijfel is gerechtvaardigd of ook onder deze omstandigheden een voldoend lange levensduur wordt bereikt als de gloeispanning van de nominale waarde afwijkt. Experimenteel is echter gebleken dat ook dan gloeispanningsvariaties van de bovengenoemde grootte kunnen worden toegelaten, zodat de zenders in kwestie zonder bezwaar uit accu's of uit batterijen kunnen worden gevoed.

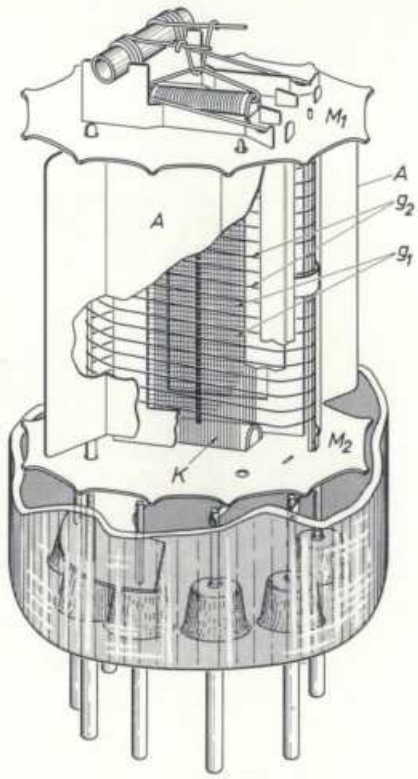


Fig. 6. Constructie van een buis met harpkatode, nl. de dubbeltetrode YL 1190. Een der beide anodes is gedeeltelijk weggenomen, waardoor de katode en de roosters zichtbaar zijn. M_1 en M_2 micaplaatjes. A anodes. g_1 stuurrooster. g_2 schermrooster. K harpkatode.

Een belangrijke eigenschap van wolfraam, waarvan hier een dankbaar gebruik wordt gemaakt, is zijn grote trekvastheid, ook bij hoge temperaturen. Hierdoor kan de draad zeer strak worden gespannen, zodat bij het optreden van schokken slechts zeer kleine zijdelingse uitwijkingen ontstaan en geen ontoelaatbaar sterk microfonisch effect optreedt. Verder vertoont wolfraam een geringe vermoeidheid bij wisselende belasting; hierdoor kunnen de buizen een zeer groot aantal malen worden in- en uitgeschakeld. Bij normale gloeispanning hebben harpkatodes dit meermalen een miljoen maal doorstaan. Wordt de gloeispanning bij het inschakelen tot de dubbele waarde verhoogd om een inschakeltijd van 0,1 seconde te verkrijgen, zoals boven is beschreven, dan kan de gloeidraad toch nog enkele honderdduizenden malen worden in- en uitgeschakeld, wat voor normale toepassingen ruim voldoende is.

Een nadeel van dun wolfraamdraad als katodemateriaal ten opzichte van indirect verhitte nikkelkatodes moge hier niet onvermeld blijven. Zowel de aard van het kernmateriaal, wolfraam, als de geringe dikte van de emitterende laag maken dat bij deze katodes gemakkelijk zg. emissievergiftiging optreedt, veroorzaakt door in de buis aanwezige gasresten. De elektronenemissie van bariumoxide berust voor een belangrijk deel op de aanwezigheid van vrij barium aan het katodeoppervlak. Van dit vrije barium gaat voortdurend een deel verloren door reactie met gasresten in de buis, maar het ontstaat opnieuw doordat het bariumoxide wordt gereduceerd door aan het nikkel toegevoegde stoffen. Met wolfraam verloopt deze reactie veel trager dan met nikkel, en dientengevolge wordt het vrije barium dat verloren gaat bij een wolfraamkatode minder snel aangevuld. Men zou de vorming van vrij barium kunnen versnellen door verhoging van de temperatuur, maar hierbij ontstaat een vergroting van de verdampingssnelheid van het katodemateriaal, waardoor, bij de geringe dikte van de hier toegepaste emitterende laag, de levensduur van de buis zou worden verkort.

Om de bovenvermelde redenen moet bij zendbuizen die zijn uitgerust met harpkatodes, tijdens het vacuümpompen zeer veel zorg worden besteed aan het verwijderen van eventuele gasresten.

De voeding van de gloeidraad

De gloeispanning van de harpkatodes bedraagt bij verschillende uitvoeringsvormen 1 à 2 V; de gloeistroom bedraagt enkele ampères. Deze getallen doen, als men ze vergelijkt met de bij de normale buizenseries gebruikelijke waarden, wellicht wat ongewoon aan. Men bedenke hierbij echter dat bij direct verhitte buizen een lage gloeispanning gunstig is voor de werking, omdat dan tussen de uiteinden van de katode een kleinere spanning staat. Speciaal bij buizen die zijn geconstrueerd voor de verwerking van signalen met hoge frequenties en waarbij, ten gevolge van de kleine afstand tussen stuurrooster en katode, de stuurspanning klein is, kan door een grote spanning tussen verschillende delen van de katode een ongelijkmatige stroomverdeling ontstaan, die de werking nadelig kan beïnvloeden.

Een gloeispanning die niet gelijk is aan die van eventuele andere gebruikte buizen, behoeft overigens in de meeste gevallen nauwelijks als een bezwaar te worden gevoeld. Iedere met buizen uitgeruste mobilofoonzender is nl. voorzien van een omzetter, waarmede de accu-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

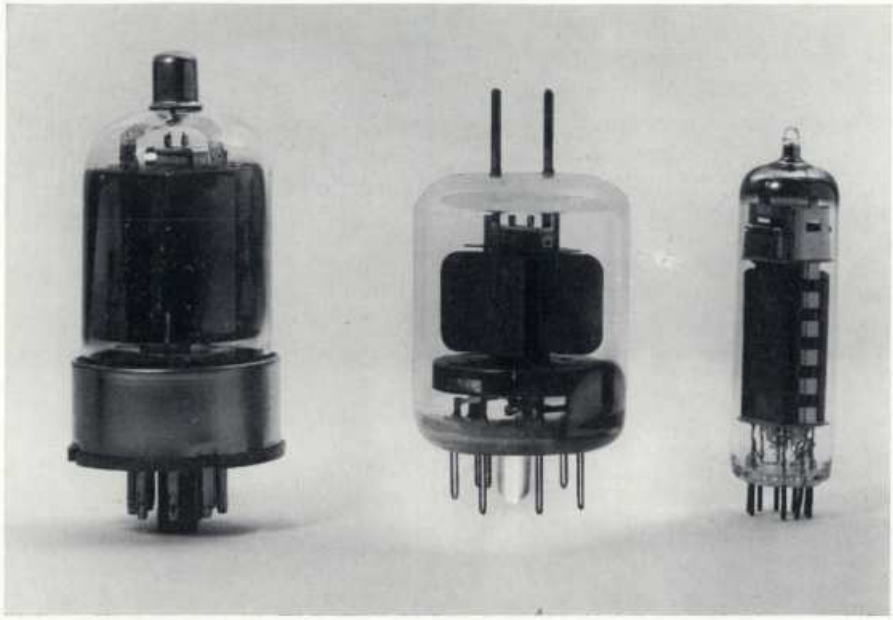


Fig. 7. Een drietal buizen die zijn voorzien van een harpkatode, nl., van links naar rechts: de tetrode QC 05/35 (maximale frequentie 175 MHz, vermogen 30 W) en de dubbeltetrodes YL 1020 (500 MHz, 18 W) en YL 1080 (200 MHz, 15 W).

spanning wordt opgevoerd. Hierbij wordt tegenwoordig meestal gebruik gemaakt van twee in balans geschakelde transistors die de accuspanning omzetten in een blokspanning [4]. Door middel van een transformator en een gelijkrichter wordt dan een gelijkspanning van de vereiste grootte opgewekt. De nodige gloeispanning kan hierbij op eenvoudige wijze worden verkregen met behulp van een extrawikkeling op de transformator.

Buizen met harpkatodes worden thans gefabriceerd voor een nuttig vermogen van 6 W tot 30 W en voor frequenties tot 500 MHz. *Fig. 7* toont als voorbeelden een drietal buizen, nl. een tetrode (type QC 05/35) en een tweetal dubbeltetrodes (YL 1020 en YL 1080). Enkele bijzonderheden van deze buizen zijn in het onderschrift vermeld.

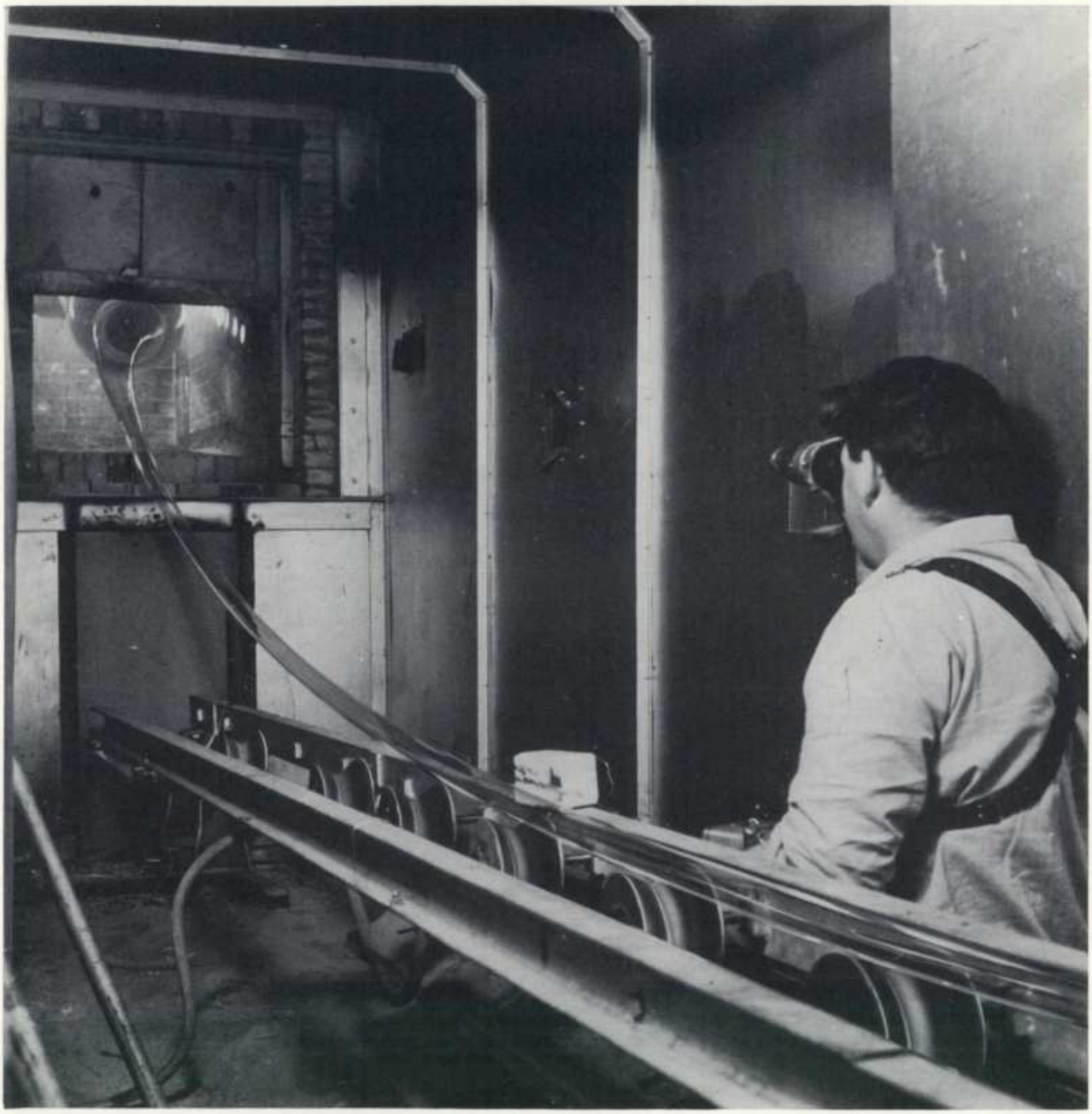
[4] Zie voor nadere bijzonderheden hieromtrent: Th. Hehenkamp en J. Wilting, Gelijkstroom-wisselstroomomzetters met transistors voor het voeden van fluorescentielampen, Philips techn. T. **20**, 347-351, 1958.

Samenvatting. Bij mobiele zend-ontvanginstallaties kan een belangrijke energiebesparing worden verkregen als gedurende de tijd dat de zender niet wordt gebruikt, de gloeidraden van de zendbuizen worden uitgeschakeld. Om toch een normaal gebruik van de installatie mogelijk te maken, moeten dan de katodes een korte opwarmtijd hebben. Met het oog hierop is de harpkatode ontwikkeld, die bestaat uit een aantal parallelgeschakelde wolfraamdraden, bedekt met een emitterende laag van bariumoxide. De opwarmtijd hiervan bedraagt slechts 0,35 seconde. Hij kan desgewenst door een kunstgreep nog worden verkort tot 0,1 s. Een tweetal voor de harpkatode gebruikte constructies worden beschreven, terwijl ook enkele eigenschappen van het gebruikte draad besproken worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Continu trekken van buisglas voor „TL" lampen



In de loop van de laatste decennia is het schilderachtige trekken van buisglas door twee glasblazers nagenoeg geheel verdrongen door een continu mechanisch procédé. Hierbij laat men vloeibaar glas op een schuin opgestelde draaiende pen (400 à 1000 °C) stromen. Aan het ondereind van de pen (op de foto linksboven juist zichtbaar) stroomt het glas er als een mantel af. Door een op de foto niet zichtbare trekinrichting, die op een afstand van enkele tientallen meters van de pen is opgesteld, wordt de buis weggetrokken. Men ziet hoe de buis gedurende de eerste ogenblikken na het verlaten van de pen dunner wordt. Op enige meters van de pen is het glas vast geworden. De buis beweegt zich dan verder over een rollenbaan (op de voorgrond) naar de trekinrichting. Daar ter plaatse is de temperatuur voldoende laag geworden om de buis aan stukken te kunnen snijden. De man op de voorgrond controleert met een pyrometer de temperatuur van de pen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Recente wetenschappelijke publikaties van medewerkers van Philips' laboratoria en fabrieken

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvraag overdrukken. Voor het aanvragen behoeft men slechts het cursief gedrukte nummer van de gewenste publikatie op te geven.

K. M. Adams: Contribution to the dynamical theory of the parametron.
Philips Res. Repts. **20**, 48-80, 1965 (no. 1). *R 531*

A. C. Aten, J. H. Haanstra en **G. Diemer:** Peculiar spectral distribution of the light emission from ZnTe during d.c. pulse excitation.
Philips Res. Repts. **20**, 125-135, 1965 (no. 2). *R 535*

K. H. Beckmann en **B. Caspar:** On the energy balance for the passage of light through a thin absorbing film.
Philips Res. Repts. **20**, 190-205, 1965 (no. 2). *R 539*

H. G. Beljers, P. F. Bongers, R. P. van Stapele en **H. Zijlstra:** A direct measurement of the large zero field splitting of Co^{2+} in Cs_3CoCl_5.
Physics Letters **12**, 81-82 en 360, 1964 (nos. 2 en 4). *3398*

K. H. J. Buschow en **J. H. N. van Vucht:** On the intermediate phases in the system samarium-aluminium.
Philips Res. Repts. **20**, 15-22, 1965 (no. 1). *R 528*

J. Dieleman: Observation of Se^{77} superhyperfine structure on the electron-paramagnetic resonance of $Fe^{3+}(3d^5)$ in cubic ZnSe.
Philips Res. Repts. **20**, 206-212, 1965 (no. 2). *R 540*

W. Ermrich: Influence of slow-electron impact upon gases adsorbed on tungsten, investigated by means of a field electron microscope.
Philips Res. Repts. **20**, 94-105, 1965 (no. 1). *R 533*

W. van Gool: The possible use of surface migration in fuel cells and heterogeneous catalysis.
Philips Res. Repts. **20**, 81-93, 1965 (no. 1). *R 532*

C. A. A. J. Greebe: Some considerations on piezoelectric plates containing charge carriers.
Philips Res. Repts. **20**, 1-14, 1965 (no. 1). *R 527*

H. G. Grimmeiss en **H. Scholz:** Optical and electrical properties of Cu-doped GaP. Part I: Photoconductivity.
Philips Res. Repts. **20**, 107-124, 1965 (no. 2). *R 534*

J. Hasker: Transverse-velocity selection affects the Langmuir equation.
Philips Res. Repts. **20**, 34-47, 1965 (no. 1). *R 530*

Y. Haven: Anionic type of lattice defects.
Proc. Brit. Ceramic Soc. **1**, 93-108, juli 1964. *3394*

H. J. Hubers: A general method to separate the principal stresses in photo-elastic measurements and its application in the determination of residual thermal stresses.
Glass Technol. **5**, 157-163, 1964 (no. 4). *3395*

J. Israël: Het metallografisch onderzoek.
Metalen e.a. Constr.mat. **19**, 291-297 en 350-356, 1964 (nos. 10 en 12), en **20**, 2-7, 1965 (no. 1). *3391*

Th. J. van Kessel: Compatibele eenzijbandmodulatie.
T. Ned. Elektronica- en Radiogen. **29**, 31-43, 1964 (no. 1). *3392*
Zie ook Philips techn. T. **25**, 317-326, 1963.

E. C. Munk: The equivalent electrical circuit for radial modes of a piezoelectric ceramic disc with concentric electrodes.
Philips Res. Repts. **20**, 170-189, 1965 (no. 2). *R 538*

E. de Niet: Parametric amplifiers used in electroacoustics, 2. Condenser microphone amplifier with semiconductor elements.
J. Audio Engng. Soc. **12**, 186-191, 1964 (no. 3). *3393*
Vervolg van *3338*.

D. J. van Ooijen en **A. S. van der Goot:** Critical currents of superconducting niobium-oxygen alloys.
Philips Res. Repts. **20**, 162-169, 1965 (no. 2). *R 537*

D. Polder en **P. Penning:** Anomalous transmission of X-rays in an elastically deformed non-isotropic crystal.
Acta crystall. **17**, 950-955, 1964 (no. 8). *3400*

J. H. van Santen: The Philips Research Laboratories at Eindhoven, the Netherlands.
Chemistry and Industry, jaarg. 1964, 1564-1570 (no. 37). *3396*

M. T. Vlaardingerbroek en **K. R. U. Weimer:** Amplification of waves by the interaction between an electron beam and a plasma.
T. Ned. Elektronica- en Radiogen. **29**, 73-89, 1964 (no. 2). *3334*

J. W. ter Vrugt: Optical properties of thin powder layers.
Philips Res. Repts. **20**, 23-33, 1965 (no. 1). *R 529*

J. H. N. van Vucht, D. J. van Ooijen en **H. A. C. M. Bruning:** Some investigations on the niobium-tin phase diagram.
Philips Res. Repts. **20**, 136-161, 1965 (no. 2). *R 536*

K. R. U. Weimer en **H. Bodt:** Electron beam-plasma interaction in a TWT.
Proc. IEEE **52**, 965-966, 1964 (no. 8). *3397*

K. Weiss en **H. A. Meijer:** Die thermische Ausdehnung von AgBr und AgBr-$CdBr_2$-Mischkristallen.
Z. phys. Chemie Neue Folge **42**, 211-220, 1964 (no. 3/4). *3399*

Jaargang 26, 1964/65, no. 11/12 blz. 345-384 Verschenen 9 juli 1965

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!